

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



DETERMINACIÓN Y VALIDACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA PARA LA
SELECCIÓN DE GENOTIPOS DE TRIGO CRISTALINO (*Triticum durum* L.)
CON TOLERANCIA AL ESTRÉS HÍDRICO.

Tesis

Que presenta VÍCTOR ADRIÁN MARTÍNEZ GONZÁLEZ
como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

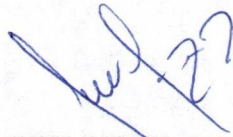
Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

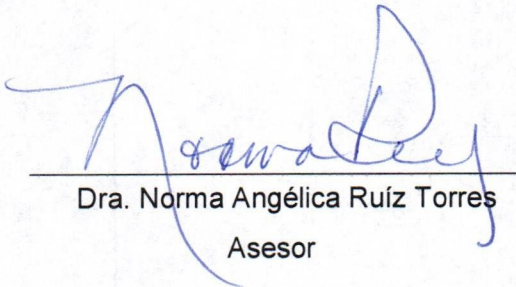
DETERMINACIÓN Y VALIDACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA PARA LA SELECCIÓN DE
GENOTIPOS DE TRIGO CRISTALINO (*Triticum durum* L.) CON TOLERANCIA AL
ESTRÉS HÍDRICO.

Tesis

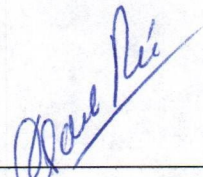
Elaborada por VÍCTOR ADRIÁN MARTÍNEZ GONZÁLEZ como requisito parcial para
obtener el grado de Maestro en Ciencias en Fitomejoramiento con la supervisión y
aprobación del Comité de Asesoría.



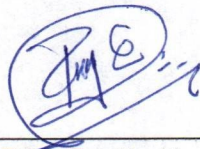
Dr. José Luis Velasco López
Director de Tesis



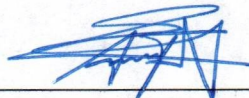
Dra. Norma Angélica Ruíz Torres
Asesor



Dr. Alejandro Javier Lozano del Río
Asesor



Dra. Pífar Espitia Hernández
Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda
Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la fortaleza, la salud y la oportunidad de culminar decorosamente una de las metas fijadas en mi vida.

A mi comité particular de asesoría, integrado por el Dr. José Luis Velasco López, quien me apoyó en este camino, me guió, aconsejó, corrigió y enseñó, sin cuyo respaldo este trabajo no hubiese sido posible; la Dra. Norma Angélica Ruiz Torres, quien siempre mostró la mayor disposición para apoyar, aconsejar y enseñar; el Dr. Alejandro Javier Lozano del Río, quien me brindó su apoyo, me escuchó y, sobre todo, me enseñó el valor humano, sacándome siempre una sonrisa; y la Dra. Pilar Espitia Hernández, quien demostró en todo momento su profesionalismo y estuvo presente ante cualquier adversidad. A todos ustedes les agradezco profundamente su enseñanza y su amistad.

Al Dr. Humberto Reyes Valdés, que siempre será un ejemplo a seguir. Su calidad humana, sencillez, sabiduría, profesionalismo y amistad fueron fundamentales en este camino; simplemente, una persona excepcional. Infinitos agradecimientos.

Al Dr. Froylán Rincón Sánchez, por su profesionalismo, rectitud y amistad; sus consejos y su sabiduría para obrar correctamente han dejado una huella profunda, por lo que le expreso mi más sincero agradecimiento y reconocimiento al legado que nos deja.

Al Dr. Javier Sánchez Ramírez, quien brindó todo su apoyo y compartió su sabiduría. Me enseñó a abordar el trabajo con entusiasmo y a que no siempre es necesario imponer severidad para obtener buenos resultados, sino saber hallar el lado ameno de cada tarea. Gracias por su amistad.

Al M.C. Modesto Colín Rico, Dr. Antonio Flores Naveda, Dra. Ana Luisa Gómez Espejo y Dr. Francisco Alfonso Gordillo Melgoza, por su valor humano, amistad y apoyo incondicional.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en especial al Departamento de Fitomejoramiento, por brindarme una formación académica de calidad, así como al SECIHTI por el apoyo económico otorgado durante mis estudios de posgrado.

DEDICATORIA

A mi madre, Adriana González Miranda, mi mayor inspiración y ejemplo de fortaleza; gracias a su amor y apoyo incondicional hoy logro cumplir esta meta. A mi padre, Víctor Hugo Martínez López, quien ha sido un pilar constante de motivación y respaldo en todo momento. A ambos, con todo mi corazón, les dedico este logro.

A mis hermanos, Sergio André Martínez González y Paulina Mayté Martínez González, mi inspiración para seguir adelante. Deseo que este logro sea un ejemplo de superación para ustedes, como ustedes lo son de amor y compañía para mí.

A Diana Laura Vizcarra Manríquez, por su amor incondicional y su valiosa compañía, por ser mi apoyo constante y la motivación que me impulsa a seguir adelante. Gracias por tu paciencia, comprensión y por mostrarme siempre el lado positivo de las cosas, incluso en los momentos más difíciles. Gracias por estar siempre conmigo.

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
HIPÓTESIS.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
IMPORTANCIA DEL TRIGO CRISTALINO EN MÉXICO	4
IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PRODUCCIÓN DE TRIGO CRISTALINO	4
MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA LA RESILIENCIA AL ESTRÉS HÍDRICO	5
ESTRATEGIAS PARA LA SELECCIÓN DE GENOTIPOS DE TRIGO CON TOLERANCIA AL ESTRÉS HÍDRICO.....	6
ÍNDICES DE SEQUÍA PARA LA EVALUACIÓN DE GENOTIPOS	7
<i>Índice de Susceptibilidad a la Sequía (SSI)</i>	7
<i>Índice de Tolerancia (TOL)</i>	8
<i>Índice de Productividad Media (MP)</i>	8
<i>Índice de Tolerancia al Estrés (STI)</i>	8
<i>Índice de Estabilidad del Rendimiento (YSI)</i>	9
<i>Índice de Resistencia a la Sequía (DI)</i>	9
<i>Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)</i>	10
CARACTERES MORFO-FISIOLÓGICOS ASOCIADOS A LA TOLERANCIA DEL ESTRÉS HÍDRICO	10
MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
ETAPA 1. EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE GRANO Y SUS COMPONENTES DE 49 LÍNEAS AVANZADAS DE TRIGO CRISTALINO DURANTE CICLO P-V 2023.....	12
ETAPA 2. EVALUACIÓN DE 15 LÍNEAS AVANZADAS DE TRIGO CRISTALINO BAJO DOS NIVELES DE LÁMINA DE RIEGO EN DOS LOCALIDADES DURANTE EL CICLO O-I 2023- 2024	13
<i>Ubicaciones de los lotes experimentales</i>	13
<i>Material Genético</i>	13

<i>Preparación del terreno</i>	14
<i>Diseño Experimental</i>	14
<i>Siembras</i>	15
<i>Fertilización</i>	16
<i>Riegos</i>	16
<i>Control de malezas</i>	17
<i>Control de plagas y enfermedades</i>	18
VARIABLES EVALUADAS.....	18
<i>Días a floración (DAF)</i>	18
<i>Días a madurez fisiológica (DMF)</i>	18
<i>Altura de la planta (ALTP)</i>	18
<i>Índice de vegetación normalizado (NDVI)</i>	18
<i>Número de espigas por metro cuadrado (EM2)</i>	19
COMPONENTES DE RENDIMIENTO.....	19
<i>Longitud de espiga (LE)</i>	19
<i>Número de espiguillas por espiga (EE)</i>	19
<i>Número de granos por espiga (GPE)</i>	19
<i>Peso de grano por espiga (PGE)</i>	19
<i>Peso de mil semillas (PMIL)</i>	19
<i>Rendimiento de grano (REND)</i>	19
<i>Peso hectolítrico (kg hL⁻¹)</i>	20
<i>Índices de sequía</i>	21
<i>Validación de índices de sequía</i>	21
ETAPA 2.1. EVALUACIÓN DE 14 LÍNEAS AVANZADAS DE TRIGO CRISTALINO Y LA VARIEDAD CIRNO BAJO DOS NIVELES DE LÁMINA DE RIEGO EN INVERNADERO DURANTE EL CICLO O-I 2023-2024.....	22
<i>Análisis estadísticos</i>	22
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
RESULTADOS DE LA ETAPA 1.....	23
<i>Análisis del rendimiento de grano y sus componentes</i>	23
<i>Análisis de caracteres morfo-fisiológicos</i>	28

<i>Análisis de correlación entre rendimiento de grano, sus componentes y caracteres morfo-fisiológicos.....</i>	<i>31</i>
RESULTADOS DE LA ETAPA 2.....	33
<i>Análisis de rendimiento de grano, sus componentes y caracteres morfo-fisiológicos.....</i>	<i>33</i>
<i>Análisis de caracteres morfo-fisiológicos</i>	<i>40</i>
<i>Identificación de líneas con tolerancia al estrés hídrico.....</i>	<i>44</i>
<i>Validación de índices de sequía para la selección de genotipos en Navidad, N.L.....</i>	<i>47</i>
<i>Validación de índices de sequía para la selección de genotipos en Zaragoza, Coahuila</i>	<i>55</i>
<i>Validación de índices de sequía para la selección de genotipos en promedio de las localidades.....</i>	<i>62</i>
<i>Correlación entre índices de tolerancia a sequía y caracteres morfo-fisiológicos.....</i>	<i>71</i>
<i>Peso de mil semillas y espigas por metro cuadrado como criterios indirectos de selección para condiciones de déficit hídrico.</i>	<i>73</i>
ANÁLISIS DE CARACTERES MORFO-FISIOLÓGICOS EVALUADOS EN INVERNADERO CICLO O-I 2023-2024	74
CONCLUSIONES.....	83
REVISIÓN DE LITERATURA	84

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características agronómicas de 14 líneas avanzadas de trigo cristalino y la variedad CIRNO evaluadas durante el ciclo Primavera-Verano 2023 en Navidad, Galeana, Nuevo León.	14
Cuadro 2. Distribuciones de los riegos aplicados en las localidades de Zaragoza Coah. y Navidad N.L. durante el ciclo O-I 2023-2024.	17
Cuadro 3. Análisis de varianza para rendimiento de grano y los componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino durante el ciclo PV-2023.	23
Cuadro 4. Análisis de varianza para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino durante el ciclo PV-2023.	24
Cuadro 5. Comparación de medias de los genotipos para rendimiento y sus componentes evaluados en el ciclo PV-2023 en Navidad, Galeana, Nuevo León.	27
Cuadro 6. Comparación de medias de las líneas para los caracteres morfo-fisiológicos evaluados en el ciclo PV-2023 en Navidad, Galeana, Nuevo León.	30
Cuadro 7. Análisis de varianza y correlación de Pearson entre rendimiento y caracteres evaluados de líneas de trigo cristalino PV-2023 en Navidad, Galeana, Nuevo León.	32
Cuadro 8. Análisis de varianza del rendimiento de grano y sus componentes en líneas de trigo cristalino, evaluadas bajo dos niveles de riego en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.	35
Cuadro 9. Análisis de varianza para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino evaluadas bajo dos niveles de riego en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.	36
Cuadro 10. Comparación de medias para rendimiento de grano y sus componentes de líneas de trigo cristalino evaluadas bajo dos niveles de riego en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.	38
Cuadro 11. Comparación de medias para rendimiento de grano y sus componentes en líneas de trigo cristalino bajo dos niveles de riego en el ciclo O-I 2023-2024.	39

Cuadro 12. Comparación de medias para rendimiento y sus componentes en líneas de trigo cristalino evaluadas en dos localidades en el ciclo OI 2023-2024.	40
Cuadro 13. Comparación de medias para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino evaluadas bajo dos niveles de riego en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.	42
Cuadro 14. Comparación de medias entre dos niveles de riego para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino evaluadas en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.	43
Cuadro 15. Comparación de medias entre dos localidades para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino evaluadas durante el ciclo O-I 2023-2024.	44
Cuadro 16. Valores de rendimiento e índices de sequía por línea de trigo cristalino bajo dos niveles de riego (RG1-RG2) en la localidad de Navidad, Nuevo León, ciclo O-I 2023-2024.	46
Cuadro 17. Valores de rendimiento e índices de sequía por línea de trigo cristalino bajo dos niveles de riego (RG1-RG2) en la localidad de Zaragoza, Coahuila, ciclo O-I 2023-2024.	47
Cuadro 18. Análisis de varianza y parámetros de regresión lineal simple de índices de sequía asociados al rendimiento de grano bajo déficit hídrico en la localidad de Navidad, N.L.....	48
Cuadro 19. Análisis de varianza y parámetros de regresión lineal simple de índices de sequía asociados al rendimiento de grano bajo déficit hídrico en la localidad de Zaragoza Coahuila.	55
Cuadro 20. Análisis de varianza y parámetros de regresión lineal simple de índices de sequía asociados al rendimiento de grano con déficit hídrico en ambas localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.	64
Cuadro 21. Análisis de correlación de Pearson entre índices de sequía, rendimiento y caracteres evaluados de líneas de trigo cristalino durante el ciclo O-I 2023-2024.	73

Cuadro 23. Análisis de varianza para caracteres evaluados en invernadero de líneas de trigo cristalino durante el ciclo OI 2023-2024.	77
Cuadro 24. Comparación de medias para caracteres evaluados de líneas de trigo cristalino en invernadero durante el ciclo O-I 2023-2024.	79
Cuadro 25. Comparación de medias de riegos para caracteres evaluados en invernadero durante el ciclo OI 2023-2024.	80
Cuadro 26. Análisis de correlación de Pearson entre Biomasa de raíz y caracteres evaluados de líneas de trigo cristalino en invernadero durante el ciclo O-I 2023-2024.	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Relación entre el índice de sequía STI y el rendimiento de grano en la localidad de Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.	49
Figura 2. Relación entre el índice de sequía YSI y el rendimiento de grano en la localidad de Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.	50
Figura 3. Relación entre el índice de sequía TOL y el rendimiento de grano en la localidad de Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.	51
Figura 4. Relación entre el índice de sequía MP y el rendimiento de grano en la localidad de Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.	52
Figura 5. Relación entre el índice de sequía SSI y el rendimiento de grano en la localidad de Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.	53
Figura 6. Relación entre el índice de sequía DI y el rendimiento de grano en la localidad de Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.	54
Figura 7. Relación entre el efecto del índice de sequía STI y el rendimiento de grano en la localidad de Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.	56
Figura 8. Relación entre el índice de sequía YSI y el rendimiento de grano en la localidad de Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.	57
Figura 9. Relación entre el índice de sequía TOL y el rendimiento de grano en la localidad de Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.	58
Figura 10. Relación entre el índice de sequía MP y el rendimiento de grano en la localidad de Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.	59
Figura 11. Relación entre el índice de sequía SSI y el rendimiento de grano en la localidad de Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.	60
Figura 12. Relación entre el índice de sequía DI y el rendimiento de grano en la localidad de Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.	61
Figura 13. Relación entre el índice de sequía (STI) y el rendimiento de grano con déficit hídrico en ambas localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.	65
Figura 14. Relación entre el índice de sequía YSI y el rendimiento de grano en ambas localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.	66
Figura 15. Relación entre el índice de sequía TOL y el rendimiento de grano en ambas localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.	67

Figura 16. Relación entre el índice de sequía MP y el rendimiento de grano en ambas localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.68

Figura 17. Relación entre el índice de sequía SSI y el rendimiento de grano en ambas localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.69

Figura 18. Relación entre el índice de sequía DI y el rendimiento de grano en ambas localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.70

RESUMEN

DETERMINACIÓN Y VALIDACIÓN DE ÍNDICES DE SEQUÍA PARA LA SELECCIÓN DE GENOTIPOS DE TRIGO CRISTALINO (*Triticum durum* L.) CON TOLERANCIA AL ESTRÉS HÍDRICO.

Por

VÍCTOR ADRIÁN MARTÍNEZ GONZÁLEZ
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN FITOMEJORAMIENTO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JOSÉ LUIS VELASCO LÓPEZ -ASESOR-

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

El trigo cristalino (*Triticum durum* L.) es un cultivo de gran relevancia para la seguridad alimentaria y la economía agrícola en zonas áridas y semiáridas; sin embargo, su producción se ve limitada por la escasa disponibilidad de agua y el incremento de temperaturas durante las etapas críticas de desarrollo del cultivo. Ante este panorama, resulta fundamental contar con criterios confiables que faciliten la identificación y selección de genotipos con mayor tolerancia al déficit hídrico que permitan mantener la productividad y estabilidad en regiones con restricción de riego.

El presente estudio tuvo como objetivo determinar y validar los índices de sequía más eficaces para la selección de genotipos de trigo cristalino (*Triticum durum* L.) con tolerancia al estrés hídrico, así como seleccionar los genotipos de trigo cristalino con buen rendimiento y tolerancia al estrés hídrico para las regiones norte y sur del estado de Coahuila. En la Etapa 1, se evaluaron 49 líneas avanzadas bajo condiciones de manejo agronómico estándar (fertilización balanceada, control eficiente de malezas y riego suficiente) en el ciclo PV-2023 en Galeana, Nuevo León.

En la Etapa 2, se evaluaron las 14 líneas superiores en rendimiento de la etapa 1 y la variedad CIRNO como testigo, en un diseño de bloques completos azar con arreglo en parcelas divididas con dos niveles de lámina de riego (1.0 y 0.33 m) en dos localidades (Galeana, N.L. y Zaragoza, Coahuila) durante el ciclo O-I 2023-2024, la parcela grande correspondió a los niveles de lámina de riego y la parcela chica a las líneas. Se calcularon seis índices de sequía; Índice de Susceptibilidad a la Sequía (SSI), Índice de Tolerancia (TOL), índice de Productividad Media (MP), índice de Tolerancia al Estrés (STI), Índice de Estabilidad del Rendimiento (YSI) y el índice de Resistencia a la Sequía (DI). Paralelamente, durante el ciclo O-I 2023-2024, se estableció un ensayo en el invernadero No. 2 de la Universidad, donde las mismas líneas y la variedad CIRNO se cultivaron en macetas de plástico bajo ambos regímenes de riego (1.0 y 0.33 m).

En relación con los resultados de la etapa 1, mediante las pruebas de comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), se identificaron 14 líneas con mejor

rendimiento de grano. Los análisis de correlación de Pearson mostraron una fuerte asociación entre el rendimiento de grano y los caracteres como peso de grano por espiga ($r=0.79$), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) ($r=0.78$) y altura de planta ($r=0.76$), los cuales reflejan una mayor eficiencia en el llenado de grano y capacidad fotosintética, atributos integrales de adaptación al estrés que favorecen la conversión de biomasa en grano.

Con respecto a los resultados de la etapa 2 mostraron efectos significativos de localidad ($p \leq 0.05$) y riego ($p \leq 0.01$) sobre el rendimiento de grano; Zaragoza presentó mayor potencial productivo (rendimiento medio = 1857 kg ha^{-1}) frente a Navidad (1201 kg ha^{-1}), y el riego con mayor disponibilidad (RG1) produjo rendimientos superiores al riego con déficit (RG2) (1829 vs 1229 kg ha^{-1}). Las comparaciones de medias de Tukey ($p \leq 0.05$), identificaron un grupo de materiales con rendimiento superior: CIRNO, 706, 711, 715, 738 y 748 (1523 - 1861 kg ha^{-1}) y componentes favorables; espigas por metro cuadrado (EM2), granos por espiga (GPE) y peso de grano por espiga (PGE) que respaldan su desempeño. En la validación de índices se observó dependencia del sitio; en Zaragoza STI y MP explicaron gran parte de la variación del rendimiento bajo déficit ($R^2 = 0.89$ y 0.79 , respectivamente) y YSI, SSI y DI mostraron asociaciones consistentes ($R^2 = 0.69$ - 0.70); en Navidad, YSI, TOL, SSI y DI presentaron asociaciones moderadas con el rendimiento ($R^2 = 0.37$ - 0.38), STI y MP tuvieron menor poder predictivo. Al evaluar ambas localidades en conjunto, STI y YSI mostraron las pendientes más pronunciadas y R^2 más altos (0.64 - 0.57), validando su robustez para predecir el rendimiento bajo déficit. Además, peso de mil semillas (PMIL) y EM2 se validaron como predictores tempranos útiles; PMIL se correlacionó positivamente con YSI ($r = 0.528$) y negativamente con TOL ($R^2 = -0.518$), SSI ($R^2 = -0.538$) y DI ($R^2 = -0.528$), mientras que EM2 presentó correlaciones moderadas con STI y MP, por lo que podrían considerarse índices para evaluar la tolerancia a la sequía de trigos cristalinos. En el ensayo en invernadero, el análisis de comparación de medias destacó que las líneas 711, 715, 716 y 749 presentaron la mayor biomasa de raíz (BRZ), la cual se correlacionó positivamente con la altura de planta y la biomasa aérea, lo

que sugiere un sistema radical más eficiente para la extracción de agua a mayor profundidad, contribuyendo a mantener la actividad fotosintética bajo condiciones déficit hídrico. Además, se realizó la comparación de medias entre regímenes de riego; los resultados mostraron que todas las variables fueron significativamente mayores ($p \leq 0.01$) bajo riego con mayor disponibilidad (RG1) frente a riego con déficit (RG2).

Integrando rendimiento absoluto, estabilidad y respuesta al déficit hídrico, las líneas 706, 711, 715, 738, 748 y 749 y la variedad de referencia CIRNO se destacaron como materiales sobresalientes que pueden evaluarse en distintas regiones para confirmar su desempeño. Asimismo, estos genotipos constituyen un recurso valioso para estudios genéticos futuros como el mapeo de QTL y la selección asistida por marcadores, los cuales permiten identificar genes asociados con la tolerancia a sequía y el alto rendimiento.

Palabras clave: Déficit hídrico, biomasa de raíz, rendimiento, líneas, caracteres.

ABSTRACT

DETERMINATION AND VALIDATION OF DROUGHT INDEXES FOR THE SELECTION OF CRYSTAL WHEAT (*Triticum durum* L.) GENOTYPES WITH HYDRIC STRESS TOLERANCE.

By

VÍCTOR ADRIÁN MARTÍNEZ GONZÁLEZ
MASTER'S DEGREE IN PLANT BREEDING SCIENCES

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DR. JOSÉ LUIS VELASCO LÓPEZ -ADVISOR-

Saltillo, Coahuila

November 2025

Durum wheat (*Triticum durum* L.) is a crop of great relevance for food security and the agricultural economy in arid and semi-arid areas; however, its production is limited by scarce water availability and rising temperatures during the crop's critical development stages. Given this scenario, it is essential to have reliable criteria that facilitate the identification and selection of genotypes with greater tolerance to water deficit to maintain productivity and stability in regions with restricted irrigation.

The present study aimed is to determine and validate the most effective drought indices for the selection of durum wheat (*Triticum durum* L.) genotypes tolerant to water stress, as well as to select durum wheat genotypes with good yield and tolerance to water stress for the northern and southern regions of the state of Coahuila. In Stage 1, 49 advanced lines were evaluated under standard agronomic management conditions (balanced fertilization, efficient weed control and sufficient irrigation) in the PV-2023 season in Galeana, Nuevo León.

In Stage 2, the 14 top-yielding lines from Stage 1 and the variety CIRNO as a check were evaluated in a randomized complete block design arranged as split-plots with two irrigation depth levels (1.0 and 0.33 m) in two locations (Galeana, N.L. and Zaragoza, Coahuila) during the O-I 2023-2024 season; the main plot corresponded to the irrigation depth levels and the subplot to the lines. Six drought indices were calculated: Drought Susceptibility Index (SSI), Tolerance Index (TOL), Mean Productivity Index (MP), Stress Tolerance Index (STI), Yield Stability Index (YSI) and Drought Resistance Index (DI). In parallel, during the O-I 2023-2024 season a greenhouse experiment was established in university greenhouse No. 2, where the same lines and the variety CIRNO were grown in plastic pots under both irrigation regimes (1.0 and 0.33 m).

Regarding the results of Stage 1, Tukey mean-comparison tests ($p \leq 0.05$) identified 14 lines with superior grain yield. Pearson correlation analyses showed a strong association between grain yield and traits such as grain weight per spike ($r = 0.79$), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) ($r = 0.78$) and plant height ($r = 0.76$), which reflect greater efficiency in grain filling and photosynthetic

capacity-integral attributes of stress adaptation that favor the conversion of biomass into grain.

Concerning the results of Stage 2, significant effects of location ($p \leq 0.05$) and irrigation ($p \leq 0.01$) on grain yield were observed; Zaragoza showed greater productive potential (mean yield = 1857 kg ha⁻¹) compared to Navidad (1201 kg ha⁻¹), and the higher-availability irrigation (RG1) produced higher yields than deficit irrigation (RG2) (1829 vs. 1229 kg ha⁻¹). Tukey mean comparisons ($p \leq 0.05$) identified a group of superior-performing materials: CIRNO, 706, 711, 715, 738 and 748 (1523–1861 kg ha⁻¹) and favorable components (spikes per square meter (EM2), grains per spike (GPE) and grain weight per spike (PGE) that support their performance. In the indices validation, site-dependence was observed: in Zaragoza, STI and MP explained much of the variation in yield under deficit ($R^2 = 0.89$ and 0.79 , respectively) while YSI, SSI and DI showed consistent associations ($R^2 = 0.69$ - 0.70); in Navidad, YSI, TOL, SSI and DI showed moderate associations with yield ($R^2 = 0.37$ - 0.38) and STI/MP had lower predictive power. When both locations were evaluated jointly, STI and YSI showed the steepest slopes and highest R^2 values (0.64 - 0.57), validating their robustness to predict yield under deficit. In addition, thousand-seed weight (PMIL) and EM2 were validated as useful early predictors; PMIL correlated positively with YSI ($r = 0.528$) and negatively with TOL ($R^2 = -0.518$), SSI ($R^2 = -0.538$) and DI ($R^2 = -0.528$), whereas EM2 showed moderate correlations with STI and MP, and thus could be considered indices for evaluating drought tolerance in durum wheat.

In the greenhouse experiment, the mean-comparison analysis highlighted those lines 711, 715, 716 and 749, which exhibited the highest root biomass (BRZ), and correlated positively with plant height and aboveground biomass, suggesting a more efficient root system for extracting water from greater depth and contributing to maintaining photosynthetic activity under water deficit conditions. Additionally, mean comparisons between irrigation regimes showed that all variables were significantly greater ($p \leq 0.01$) under the higher-availability irrigation (RG1) compared to deficit irrigation (RG2).

Integrating absolute yield, stability and response to water deficit, lines 706, 711, 715, 738, 748 and 749 and the reference variety CIRNO stood out as outstanding materials that can be evaluated across different regions to confirm their performance. Furthermore, these genotypes constitute a valuable resource for future genetic studies such as QTL mapping and marker-assisted selection, which allow the identification of genes associated with drought tolerance and high yield.

Keywords: Water deficit, root biomass, yield, lines, traits.

INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum spp. L.*) es el segundo cultivo de mayor importancia económica y de mayor producción a nivel mundial después del maíz. Su producción asciende a 763 millones de toneladas según la FAO (2020). Y alrededor del 60% es utilizada en la alimentación humana debido a su alto aporte energético y contenido de proteínas (CANIMOLT, 2017). México produce 3.61 millones de toneladas, de la cual el trigo cristalino representa el 60% con lo que se satisface el consumo nacional, y también posiciona al país como el tercer exportador de este producto a nivel mundial (SIAP, 2022). Sin embargo, la producción de trigo en las regiones áridas y semiáridas de México es afectado por la escasez de agua para riego, y por las altas temperaturas durante las etapas de floración y desarrollo del grano, por tal motivo, una forma de incrementar la productividad de los cultivos bajo estas condiciones es desarrollar variedades con mayor tolerancia al estrés hídrico, con el propósito de incrementar los niveles de productividad y satisfacer la demanda de alimentos (Gómez *et al.*, 2022).

En las áreas de temporal en México, la escasez de agua en el suelo es el principal factor limitante del desarrollo y rendimiento de los cultivos. En este sentido, Hernández-Ochoa *et al.* (2018) menciona que una forma de mejorar el rendimiento de grano puede lograrse a través de la selección de genotipos mejor adaptados y con genética para tolerancia a factores abióticos desfavorables. Sin embargo, el carácter de tolerancia al estrés hídrico está controlado por muchos genes, lo que hace difícil su incorporación en las nuevas variedades. Además, para incorporar varios caracteres en los materiales como: mayor rendimiento, calidad, y tolerancia al estrés hídrico, se realiza de manera simultánea, por la cual, es un proceso complejo, ya que se requiere llevar a cabo una selección efectiva de materiales en condiciones de campo (Olivoto *et al.*, 2019). Uno de los índices que se han utilizado para la selección de genotipos tolerantes a la sequía en campo, es el índice de susceptibilidad a la sequía, propuesto por Fischer y Maurer (1978), que consiste en relacionar el potencial de un cultivo bajo óptimas

condiciones y el rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico. La selección de materiales en campo se lleva a cabo con ensayos establecidos en diferentes ambientes para conocer la interacción genotipo x ambiente (IGA), e identificar el material con mayor adaptación y estabilidad en productividad (Gauch y Zobel, 2009). Del mismo modo, el análisis preciso del fenotipo de los materiales ante condiciones de estrés permite cuantificar la respuesta del rendimiento y sus componentes fisiológicos, así como la identificación de genes favorables; algunos caracteres morfo-fisiológicos relacionados al estrés hídrico son: raíces profundas, eficiencia transpiratoria, senescencia retrasada y sincronía en la floración (Reynolds *et al.*, 2012). La selección basada en una combinación de índices constituye un criterio eficaz para la identificación de materiales con tolerancia a la sequía. Asimismo, el análisis de regresión resulta una herramienta útil para determinar el grado de asociación lineal entre las variables evaluadas, facilitando la identificación de caracteres agronómicos relevantes vinculados a la tolerancia a la sequía (Mwadzingeni *et al.*, 2016).

OBJETIVOS

Objetivo general

- Validar los índices de tolerancia a la sequía para la selección de genotipos de trigo cristalino. Y determinar la asociación entre los caracteres morfo-fisiológicos y los índices de sequía.

Objetivos específicos

- Determinar la correlación de caracteres morfo-fisiológicos relacionados con el estrés hídrico en genotipos de trigo cristalino.
- Validar los genotipos de trigo cristalino con buen rendimiento y tolerancia al estrés hídrico para las regiones norte de Coahuila y sur de Nuevo León.

HIPÓTESIS

H_a : Los caracteres morfo-fisiológicos están significativamente correlacionados con la tolerancia a la sequía en genotipos de trigo cristalino, permitiendo su uso como criterios de selección para identificar materiales con alto potencial de rendimiento en condiciones de estrés hídrico.

H_0 : Los caracteres morfo-fisiológicos no están significativamente correlacionados con la tolerancia a la sequía en genotipos de trigo cristalino, ni permiten su uso como criterios de selección para identificar materiales con alto potencial de rendimiento en condiciones de estrés hídrico.

REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia del trigo cristalino en México

En México, el trigo cristalino (*Triticum durum* L.) es un cultivo de importancia económica debido a su contribución a la industria alimentaria, en especial para la producción de pastas y otros productos derivados. La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2024), reporta que la producción anual es de 1.2 millones de toneladas, que representa el 15% de la producción nacional total de trigo y, de las cuales son destinadas tanto a la exportación como al abastecimiento de la industria nacional de pastas y harinas. Además, se pronostica un incremento en su demanda por causa de la expansión del mercado de los productos alimenticios basados en este cereal. La producción se concentra en los estados de Sonora, Baja California, Sinaloa y Chihuahua, siendo Sonora el principal productor con más del 80% de la producción nacional, gracias a su clima favorable y a una infraestructura de riego eficiente (SADER, 2024).

Impacto del cambio climático en la producción de trigo cristalino

La producción de trigo cristalino está vinculada a las condiciones climáticas de la región donde se desarrolla. Sin embargo, el cambio climático representa un desafío creciente que amenaza la sostenibilidad de la producción en las zonas productoras de este cereal. Las proyecciones indican que en la próxima década aumentará la frecuencia y severidad de las olas de calor y los periodos de sequía, lo que intensificará el estrés hídrico en las principales regiones productoras de trigo. Este fenómeno impactará en los procesos fisiológicos de la planta como la fotosíntesis, la transpiración y la eficiencia en el uso del agua. Y en particular cuando ocurre en las etapas de floración y llenado del grano, que son etapas fenológicas altamente sensibles al estrés hídrico, por el cual es crítico, ya que afecta la polinización y el tamaño del grano, y como resultado se observa una reducción en el rendimiento y la calidad del grano (CIMMYT, 2021).

Para mitigar estos efectos, la investigación agrícola en México ha enfocado sus esfuerzos en el desarrollo de variedades de trigo cristalino con mayor tolerancia

al estrés hídrico con el fin de mantener la productividad del cultivo bajo condiciones climáticas adversas. Bajo este contexto, instituciones como el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) trabajan en la selección de genotipos con mayor eficiencia en el uso del agua que contengan sistemas radiculares más profundos y una mejor regulación estomática, las cuales son factores esenciales para garantizar la sostenibilidad de la producción ante los efectos del cambio climático (CIMMYT, 2021).

Mejoramiento genético para la resiliencia al estrés hídrico

El incremento de las temperaturas y la reducción en la disponibilidad de agua para riego representan factores críticos que limitan la productividad de cultivos como el trigo cristalino. Liu *et al.* (2019) destacan que el aumento de la temperatura puede reducir significativamente los rendimientos de trigo a nivel global. Ante este panorama los programas de mejoramiento genético han intensificado sus esfuerzos en la identificación y selección de genotipos que presenten tolerancia a la sequía, altas temperaturas, salinidad, entre otros factores abióticos.

Investigaciones recientes han identificado que las características de las plantas como la eficiencia fotosintética, la profundidad del sistema radicular y la capacidad de retención de agua en el suelo, son claves para mejorar la tolerancia del trigo al estrés hídrico. Por lo cual estos rasgos resultan esenciales para garantizar un rendimiento estable en condiciones de sequía prolongada y altas temperaturas (Dencic *et al.*, 2000). Redden (2013) en un estudio basado en genómica y fenotipado de precisión, identificó genotipos con una notable estabilidad en su rendimiento bajo condiciones adversas. En otro estudio, reportaron que sin medidas de adaptación los rendimientos de trigo podrían disminuir significativamente en diversas regiones (Asseng *et al.*, 2019). Estos hallazgos sugieren que las implementaciones de estrategias de tolerancia al estrés hídrico y a altas temperaturas es crucial para mantener la productividad del trigo en el escenario de cambio climático.

Estrategias para la selección de genotipos de trigo con tolerancia al estrés hídrico

El mejoramiento genético del trigo cristalino frente al estrés hídrico es fundamental para garantizar la estabilidad del rendimiento en regiones con disponibilidad limitada de agua. Para ello, se han implementado estrategias basadas en la evaluación fenotípica y la selección de genotipos con características deseables. Métodos como la selección masal y el retrocruzamiento han sido efectivos para identificar materiales con mayor adaptación a la sequía, permitiendo la obtención de líneas con mayor estabilidad productiva (Reynolds *et al.*, 2009).

Un aspecto clave en este proceso es la identificación de rasgos morfo-fisiológicos asociados a la tolerancia al déficit hídrico, como la profundidad radicular, la eficiencia en el uso del agua y la capacidad de almacenamiento hídrico en el grano. La evaluación de estos atributos en ensayos de campo bajo distintos niveles de humedad ha facilitado la selección de genotipos con mejor desempeño en condiciones de sequía (Araus y Cairns, 2014). Además, la variabilidad genética sigue siendo un factor determinante en el éxito del mejoramiento, por lo que se han realizado cruces estratégicos entre genotipos tolerantes a la sequía y líneas de alto rendimiento. Estas estrategias han permitido identificar materiales con mayor estabilidad y mejor adaptación a condiciones de estrés hídrico, favoreciendo el desarrollo de variedades más resilientes (Ayed *et al.*, 2021).

En este contexto, los índices de sequía son herramientas valiosas para la selección de genotipos con buen rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico dentro de los programas de mejoramiento genético (Thungo *et al.*, 2019). En algunos estudios han reportado el uso de los índices de sequía para la selección de los genotipos Syndioux y D117 que mostraron buen potencial de rendimiento y además con tolerancia al estrés hídrico bajo diversas condiciones climáticas (Maccaferri *et al.*, 2011). En otros experimentos donde utilizaron los índices de sequía les permitieron identificar varios genotipos que mantuvieron un buen rendimiento bajo condiciones de sequía, por lo que recomendaron el uso de los

índices de sequía en los programas de mejoramiento genético (Haile *et al.*, 2019; Mohammadi y Abdulahi, 2017).

Además, gracias a los avances en genética se ha logrado identificar genes asociados con la tolerancia a la sequía. Se han reportado diversos *loci* de rasgos cuantitativos (QTLs) vinculados con características como la profundidad de las raíces y la eficiencia fotosintética bajo condiciones de sequía. Estos marcadores genéticos permiten la selección de genotipos superiores y complementan los métodos tradicionales de mejoramiento (Nachit y Elouafi, 2004).

Índices de sequía para la evaluación de genotipos

Los índices de sequía son una herramienta utilizada para evaluar la tolerancia a la sequía en los cultivos, ya que permiten clasificar los genotipos con base en su rendimiento bajo condiciones de sequía y en condiciones óptimas de humedad del suelo.

Índice de Susceptibilidad a la Sequía (SSI)

Entre los siete índices más utilizados se encuentran el índice de Susceptibilidad a la Sequía (SSI) propuesto por Fischer y Maurer (1978), que mide la reducción relativa del rendimiento bajo sequía en comparación con las condiciones óptimas lo que lo hace útil para identificar los genotipos más sensibles a la falta de agua. La fórmula matemática para calcular el SSI es:

$$SSI = \frac{1 - \frac{Y_s}{Y_p}}{1 - \frac{\overline{Y_s}}{\overline{Y_p}}}$$

Donde Y_s es el rendimiento bajo estrés hídrico, Y_p es el rendimiento en condiciones óptimas, $\overline{Y_s}$ es el rendimiento promedio de todos los genotipos bajo estrés hídrico y $\overline{Y_p}$ es el rendimiento promedio de todos los genotipos en condiciones óptimas.

Los valores bajos de SSI indican mayor tolerancia del genotipo a la sequía, menor pérdida del rendimiento lo que implica menor susceptibilidad en condiciones de sequía.

Índice de Tolerancia (TOL)

El segundo índice es el de Tolerancia (TOL) descrito por Rosielle y Hamblin (1981), se define como la diferencia del rendimiento entre condiciones óptimas y de estrés hídrico.

La fórmula matemática para calcular el índice de TOL es:

$$TOL = Y_p - Y_s$$

Donde Y_p es el rendimiento en condiciones óptimas y Y_s es el rendimiento bajo estrés hídrico.

Los valores bajos del índice de TOL indican una mayor tolerancia a la sequía ya que muestran una menor diferencia entre el rendimiento en condiciones de estrés y el rendimiento óptimo por la cual refleja la capacidad del genotipo para mantener su productividad en condiciones adversas.

Índice de Productividad Media (MP)

El tercer índice es el de Productividad Media (MP) propuesto por Rosielle y Hamblin (1981), que mide el rendimiento promedio de un genotipo tanto en condiciones de estrés hídrico (Y_s) como en condiciones óptimas (Y_p) y refleja el rendimiento promedio sin considerar la magnitud de la reducción bajo estrés.

La fórmula matemática para calcular el índice de MP es:

$$MP = \frac{(Y_p + Y_s)}{2}$$

donde Y_p es el rendimiento en condiciones óptimas y Y_s es el rendimiento bajo estrés hídrico.

El índice de MP no mide directamente la tolerancia al estrés, sino que proporciona una estimación del rendimiento medio, lo que lo hace útil para seleccionar materiales con buen comportamiento en diferentes condiciones ambientales.

Índice de Tolerancia al Estrés (STI)

El cuarto índice es el de Tolerancia al Estrés (STI) descrito por Fernandez (1993), que proporciona más información de los genotipos que muestran valores en equilibrio entre el rendimiento y la tolerancia a la sequía, la cual facilita la selección de materiales más estables en distintos ambientes.

La fórmula matemática para calcular el índice de STI es:

$$STI = \frac{(Yp * Ys)}{\overline{Yp}^2}$$

Donde, (Yp) es el rendimiento de un genotipo en condiciones óptimas, su rendimiento bajo estrés hídrico (Ys) y el rendimiento promedio de la población en condiciones óptimas (\overline{Yp}) .

Índice de Estabilidad del Rendimiento (YSI)

El quinto índice es el de Estabilidad del Rendimiento (YSI) propuesto por Bouslama y Schapaugh (1984), que mide la estabilidad del rendimiento de un genotipo en condiciones de sequía en comparación con condiciones óptimas.

La fórmula matemática para calcular el índice de YSI es:

$$YSI = \frac{Ys}{Yp}$$

Donde Ys es el rendimiento del genotipo en condiciones de sequía y Yp es el rendimiento del genotipo en condiciones óptimas.

Valores más altos de YSI indican que el genotipo mantiene un mayor porcentaje de su rendimiento en condiciones de estrés con mayor estabilidad frente a la sequía.

Índice de Resistencia a la Sequía (DI)

El sexto índice es el de Resistencia a la Sequía (DI) propuesto por Lan (1998), que permite identificar genotipos que presentan un rendimiento superior al promedio bajo condiciones de estrés hídrico.

La fórmula matemática para calcular el índice de DI es:

$$DI = \frac{Ys}{\overline{Ys}}$$

Donde Ys es el rendimiento del genotipo en condiciones de sequía y \overline{Ys} es el rendimiento promedio de todos los genotipos en condiciones de sequía. Valores mayores de DI indican una mejor adaptación a condiciones de sequía.

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

El séptimo índice es el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés). Que mide la actividad fotosintética y el vigor de las plantas de manera indirecta mediante la reflectancia de la radiación en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el rojo visible (Red). En situaciones de sequía cuando los genotipos que logran mantener valores altos de NDVI se asocian a una mayor capacidad para sostener su actividad fotosintética y la integridad de sus tejidos foliares y como consecuencia exhiben una mayor tolerancia a la sequía (Yengoh *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015).

La fórmula matemática para calcular el NDVI es:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Donde NIR es la reflectancia en el espectro del infrarrojo cercano y RED es la reflectancia en el espectro de la luz roja visible. Valores cercanos a 1 indican vegetación saludable con alta actividad fotosintética mientras que valores cercanos a 0 sugieren vegetación estresada o área sin vegetación (Yengoh *et al.*, 2015).

Caracteres morfo-fisiológicos asociados a la tolerancia del estrés hídrico

Los caracteres morfo-fisiológicos de las plantas desempeñan un papel fundamental para la tolerancia al estrés hídrico. Entre los caracteres que mayor se asocian al estrés hídrico se encuentra el sistema radicular, por lo que las plantas con el desarrollo de un sistema radicular profundo y denso es crucial para que puedan acceder a reservas de agua ubicadas en las capas más profundas del suelo. Esta característica resulta esencial en regiones áridas con periodos prolongados sin precipitación, que garantiza un rendimiento estable de los genotipos bajo condiciones de sequía (Chen *et al.*, 2021).

La cantidad de clorofila en las hojas es otro carácter asociado a la tolerancia a la sequía. Las plantas con niveles altos de clorofila durante los periodos de estrés hídrico presentan mayor eficiencia fotosintética, mejor desarrollo y estabilidad en la producción de granos. Este mecanismo es crucial en ambientes con sequías,

ya que las plantas optimizan el uso de los recursos hídricos disponibles (Christopher *et al.*, 2016).

Otro rasgo fisiológico de las plantas para la tolerancia a la sequía es la regulación estomática. Las plantas que presentan una mayor capacidad para controlar la apertura y el cierre de las estomas logran reducir la pérdida de agua por transpiración. Una regulación estomática eficiente mantiene la integridad de los tejidos foliares, preserva la actividad fotosintética y el verdor de la planta durante periodos de sequía. Este mecanismo permite un uso más eficiente del agua disponible al aumentar la resistencia de las plantas al estrés hídrico (Fang y Xiong, 2015; Wen *et al.*, 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

Etapa 1. Evaluación del rendimiento de grano y sus componentes de 49 líneas avanzadas de trigo cristalino durante ciclo P-V 2023

El estudio se llevó a cabo en el Campo Experimental “Ing. Humberto Treviño Siller” de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Ejido Navidad, Galeana, Nuevo León, a una altitud de 1 891 m. Entre las coordenadas 24°50’ latitud norte y 100°12’ longitud oeste. Este sitio se caracteriza por un clima en verano con temperaturas medias de 21.5°C, con máximas que pueden superar 30°C y precipitaciones medias de 425 mm, además, la evapotranspiración es alta, debido a sus temperaturas cálidas y fuerte radiación solar.

El material genético fueron 49 líneas avanzadas de trigo cristalino con características de alto potencial de rendimiento, calidad y contenido de proteína en el grano, las cuales fueron proporcionadas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

El experimento se estableció bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones, utilizando un modelo mixto para las variables evaluadas las cuales comprenden tanto los componentes de rendimiento como los caracteres morfo-fisiológicos. En este análisis, el efecto de las repeticiones se trató como aleatorio, mientras que el efecto de las líneas se consideró como fijo.

El modelo estadístico utilizado fue:

$$y_{ij} = \mu + \beta_i + T_j + e_{ij}$$

Donde:

y_{ij} = Variable observada

μ = Efecto de la media general

β_i = Efecto del i-ésimo bloque

T_j = Efecto de la j-ésima línea

e_{ij} = Error experimental para el i-ésimo bloque del j-ésimo genotipo

Las unidades experimentales consistieron en dos camas de 0.9 m ancho y 4 m de largo (7.2 m²). La siembra se realizó el 8 de julio de 2023 de manera manual a una densidad de 67 kg ha⁻¹ de semilla. El manejo agronómico consistió en la aplicación de la dosis de fertilización 230-50-30 (N-P-K). El control de malezas y plagas se llevó a cabo mediante aplicaciones de herbicidas e insecticidas, en función del nivel de infestación observado. Las variables evaluadas fueron días a floración en días (DAF), altura de planta en cm (ALT), Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), número de espigas por metro cuadrado en espigas/m² (EM2) y rendimiento de grano ajustado al 12% de humedad en kg ha⁻¹ (REND).

Etapas 2. Evaluación de 15 líneas avanzadas de trigo cristalino bajo dos niveles de lámina de riego en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024

Ubicaciones de los lotes experimentales

Los estudios se llevaron a cabo en dos localidades. El primer estudio se realizó en los terrenos del Campo Experimental “Ing. Humberto Treviño Siller” de la UAAAN, ubicado en el ejido Navidad, Galeana, Nuevo León. Esta área presenta una temperatura media anual de 17°C, con una precipitación media anual de 350 mm.

El segundo estudio se realizó en los terrenos de la Estación Experimental Unidad Norte de la UAAAN, Zaragoza, Coahuila, entre las coordenadas 28°33' latitud norte y 100°55' longitud oeste, a una altitud de 350 m. Esta región presenta una temperatura media anual de 19°C y con una precipitación media anual de 350 mm.

Material Genético

Se conformó de 14 líneas de trigo cristalino que fueron seleccionadas de la Etapa 1 con base en sus desempeños superiores en rendimiento de grano y se eligió la variedad CIRNO como testigo. En el Cuadro 1 se presentan las características agronómicas de las 14 líneas seleccionadas y la variedad CIRNO.

Cuadro 1. Características agronómicas de 14 líneas avanzadas de trigo cristalino y la variedad CIRNO evaluadas durante el ciclo Primavera-Verano 2023 en Navidad, Galeana, Nuevo León.

Línea	Características agronómicas				
	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Altura (cm)	NDVI	Espigas•m ⁻²	Días a floración
736	1654.72	46.50	43.50	135.00	90
706	1756.69	40.50	44.50	138.06	81
CIR	1834.22	45.50	44.00	104.17	81
749	1848.35	40.00	39.50	86.39	90
745	1849.67	43.50	49.25	101.94	90
711	1858.79	37.50	40.00	81.11	90
716	2014.50	42.50	46.75	102.78	81
713	2018.01	46.50	47.50	125.83	81
739	2062.04	49.00	47.75	89.17	90
748	2115.97	42.50	47.50	79.44	90
738	2462.19	46.50	38.50	77.50	90
715	2482.21	48.00	44.50	93.61	90
740	2512.57	45.50	43.50	111.67	90
728	2793.67	49.00	51.00	95.28	90
705	2868.50	51.50	52.50	115.00	90

Preparación del terreno

En ambas localidades experimentales se realizaron las actividades de preparación del terreno las cuales consistieron en realizar un rastreo mecánico, posteriormente con un implemento de acamadora se formaron las camas de siembra con dimensiones de 0.9 m de ancho e incluyendo 2 hileras sobre cada cama de siembra.

Diseño Experimental

Los tratamientos fueron distribuidos bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas con dos bloques utilizando un modelo mixto para las variables evaluadas. En este análisis, el efecto de bloque anidado en

riegos y en localidades, se trató como aleatorio, mientras que el efecto de las líneas, riegos, localidades, la interacción riego•línea, línea•localidad, riego•localidad y riego•línea•localidad se consideraron como fijos.

Las parcelas grandes correspondieron a los dos niveles de lámina de riego mientras que las parcelas chicas estuvieron representadas por las 14 líneas. Las unidades experimentales consistieron en dos camas de 0.9 m de ancho y 2 m de largo (3.6 m²). En ambas localidades.

El modelo estadístico utilizado fue:

$$y_{ijk} = \mu + L_i + R_l + \beta_{j(l_i)} + \delta_{j l(i)} + \tau_k + (R \times \tau)_{lk} + (\tau \times L)_{ki} + (R \times L)_{li} + (R \times \tau \times L)_{lki} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

L_i = efecto de la i-ésima localidad

$\beta_{j(l_i)}$ = efecto del j-ésimo bloque anidado en el l-ésimo riego anidado en la i-ésima localidad

R_l = efecto del l-ésimo riego

$\delta_{j l(i)}$ = error₁: variación del j-ésimo bloque dentro del l-ésimo riego dentro de la i-ésima localidad modelado como aleatorio

τ_k = efecto de la k-ésima línea

$(R \times \tau)_{lk}$ = efecto de la interacción del l-ésimo riego por la k-ésima línea

$(\tau \times L)_{ki}$ = efecto de la interacción de la k-ésima línea por la i-ésima localidad

$(R \times L)_{li}$ = efecto de la interacción del l-ésimo riego por la i-ésima localidad

$(R \times \tau \times L)_{lki}$ = efecto de la interacción del l-ésimo riego por la k-ésima línea por la i-ésima localidad

ε_{ijkl} = error₂: variación no explicada dentro de cada parcela grande

Siembras

Las siembras de los experimentos en ambas localidades se llevaron a cabo durante los ciclos Otoño-Invierno 2023-2024. En Zaragoza Coahuila se realizó el 21 de diciembre de 2023, mientras que en Galeana Nuevo León fue el 17 de enero de 2024.

La siembra se realizó de forma manual, depositando la semilla al fondo de las hileras marcadas sobre cada cama de siembra y posterior se cubrió la semilla con tierra. La densidad de siembra fue 80 kg ha^{-1} de semilla. Finalmente se colocó la cintilla de riego, una sobre cada cama de siembra.

Fertilización

La fertilización consistió en una dosis total de 260-100-00 (N-P-K), mediante la aplicación de UREA y MAP (Fosfato Monoamónico). El 40% del nitrógeno y el 100% de fósforo se aplicaron al momento de la siembra. El 40% restante del nitrógeno se aplicó durante la etapa de macollamiento (estadío 20, según la escala de Zadoks), y el 20% final se aplicó en la etapa de espigamiento (estadío 50, escala de Zadoks). Además, al inicio de la etapa de encañe, se aplicó el fertilizante foliar Ultrasol® Micro Rexene BSP Mix con una dosis de 0.5 kg ha^{-1} .

Riegos

Para garantizar un buen desarrollo inicial del cultivo en los dos tratamientos de láminas de riego (R1 y R2), se aplicaron tres riegos de auxilios en las mismas fechas. Posteriormente, las aplicaciones de los riegos de auxilios se diferenciaron hasta completar la lámina total para cada nivel (Cuadro 2).

Cuadro 2. Distribuciones de los riegos aplicados en las localidades de Zaragoza Coah. y Navidad N.L. durante el ciclo O-I 2023-2024.

Láminas de riego y fecha de aplicación							
Número de Riegos	Riego 1	Navidad N.L.	Zaragoza Coah.	Riego 2	Navidad N.L.	Zaragoza Coah.	Etapa fenológica
Riego de germinación	☑	18/01/24	22/12/23	☑	18/01/24	22/12/23	Siembra
1 ^{er} Riego de auxilio	☑	2/02/24	04/01/24	☑	2/02/24	04/01/24	Emergencia
2 ^{do} Riego de auxilio	☑	16/02/24	13/01/24	☑	16/02/24	13/01/24	Principio de Macollamiento
3 ^{er} Riego de auxilio	☑	27/02/24	23/01/24	☐	-	-	Macollamiento
4 ^{to} Riego de auxilio	☑	09/03/24	02/02/24	☐	-	-	Inicio de encañe
5 ^{to} Riego de auxilio	☑	20/03/24	12/02/24	☑	07/03/24	06/02/24	Encañe
6 ^{to} Riego de auxilio	☑	31/03/24	22/02/24	☐	-	-	Espigamiento
7 ^{to} Riego de auxilio	☑	11/04/24	03/03/24	☐	-	-	Espigamiento
8 ^{to} Riego de auxilio	☑	22/04/24	13/03/24	☑	27/03/24	01/03/24	Floración
9 ^{to} Riego de auxilio	☑	03/05/24	23/03/24	☐	-	-	Llenado de grano
10 ^o Riego de auxilio	☑	14/05/24	02/04/24	☐	-	-	Llenado de grano
11 ^o Riego de auxilio	☑	25/05/24		☐	-	-	Madurez fisiológica
Lámina total							
Zaragoza Coah.	37.27 cm			20.92 cm			
Navidad N.L.	42.24 cm			19.35 cm			

Control de malezas

Cuando el cultivo se encontraba en la etapa de encañe (estadío 30, escala Zadoks) a los 42 días después de la siembra (dds), se observó presencia de malezas de hojas anchas por lo que se controlaron mediante la aplicación de herbicida PEAK® (prosulfuron) a una dosis de 30 g ha⁻¹. En etapas posteriores, las malezas fueron controladas manualmente mediante deshierbes con azadón.

Control de plagas y enfermedades

En la misma etapa de encañe y a los 42 dds, se detectó incidencia de pulgones por lo que se aplicó DELTAPYR® (dimetoato) 40 C.E a una dosis de 1 L ha⁻¹. No se observó incidencia de enfermedades durante el desarrollo del cultivo, por lo que no fue necesario aplicaciones de control adicionales.

Variables evaluadas

Días a floración (DAF)

Los días a floración se registraron como el número de días que transcurrieron desde la siembra hasta que más del 50% de las plantas de cada parcela alcanzaron la etapa de floración (estadío 60, escala de Zadoks) en días.

Días a madurez fisiológica (DMF)

Los días a madurez fisiológica se registraron como el número de días que transcurrieron desde la siembra hasta que más del 50% de las plantas alcanzaron la etapa de madurez fisiológica (estadío 90, escala de Zadoks) en días.

Altura de la planta (ALTP)

Con una regla graduada se registró la altura desde la base de la planta hasta la parte final de la espiga de las plantas centrales de cada parcela durante la etapa de madurez fisiológica (estadío 90, escala de Zadoks) en cm.

Índice de vegetación normalizado (NDVI)

Se determinó mediante un espectralradiómetro portátil GreenSeeker® Handheld. Para ello, se recorrió cada parcela manteniendo el sensor a una altura de 50 cm sobre el dosel del cultivo. Las mediciones se realizaron durante la etapa de llenado inicial de grano (estadío 70, escala de Zadoks), registrando el valor de NDVI correspondiente a cada parcela.

Número de espigas por metro cuadrado (EM2)

Para la variable de espigas por metro cuadrado, se contaron las espigas en una cama (1.8 m²) de cada parcela, posteriormente se extrapolaron los datos a número de espigas/m².

Componentes de rendimiento

Para su determinación se colectaron 10 espigas de manera aleatoria por cada parcela y fueron trasladados al laboratorio para las mediciones de:

Longitud de espiga (LE): de cada una de las espigas, se midieron desde la base del raquis hasta la parte final de la espiga sin contar las aristas con el uso de una regla graduada y se registró el dato promedio por parcela en cm.

Número de espiguillas por espiga (EE): de cada una de las espigas, se contaron las espiguillas presentes en cada espiga. Posteriormente, se calculó el promedio por parcela y se registró el dato en espiguillas/espiga.

Número de granos por espiga (GPE): las 10 espigas se trillaron en una trilladora de laboratorio y posteriormente se contaron los granos. En seguida el total se dividió entre las 10 espigas y se registró el valor en granos/espiga.

Peso de grano por espiga (PGE): los granos de cada parcela se pesaron con ayuda de una balanza digital, después el valor se dividió entre las 10 espigas y, se registró el valor en g/espiga.

Peso de mil semillas (PMIL): Con la información del número de granos/espiga y el peso de granos/espiga de cada parcela, se estimó el peso promedio de un solo grano y se multiplicó por 1000 y, se registró el valor en g/mil semillas.

Rendimiento de grano (REND)

La cosecha se llevó a cabo cuando las líneas alcanzaron la etapa de cosecha correspondiente a la fase 99 de la escala de Zadoks. Para ello, las plantas fueron cortadas manualmente con una hoz a una altura de 30 cm desde la superficie del suelo en una cama de cada parcela (1.8 m²). Las plantas de cada parcela se

trillaron por separado con una cosechadora combinada estacionaria para parcela tipo Pullman. Posteriormente, las muestras de grano de cada parcela se limpiaron, se midieron los contenidos de humedad en % con ayuda de un “medidor de humedad de grano” Mt-pro 08125 Agratronix y se pesaron con una balanza analítica y se registraron los valores en g/parcela. Con base en esta información, se determinaron los rendimientos de grano ajustados a un 12% de humedad con base la metodología descrita en el Manual de Determinación de Rendimiento de trigo (CIMMYT, 2012). Los valores se registraron en kg ha⁻¹.

Para determinar el rendimiento seco se utilizó la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} & \text{Rendimiento seco (kg ha}^{-1}\text{)} \\ & = \frac{\text{Peso del grano total} - \text{Cantidad de Humedad}}{\text{Área}} \times 10 \end{aligned}$$

Posteriormente se ajustó el rendimiento a un contenido de humedad del 12%, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento al 12\% de H}_2\text{O (kg ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Rendimiento seco}}{0.88}$$

Peso hectolítrico (kg hL⁻¹)

Se determinó mediante la medición de la masa de una muestra de grano en un volumen estándar. Para ello, se utilizó una balanza de peso hectolítrico marca OHAUS. Se utilizó el cilindro medidor con capacidad de 1 litro para obtener el volumen exacto de grano. El llenado del cilindro se realizó de manera uniforme, permitiendo que los granos se acomodaran libre y sin exceso de compactación. Una vez lleno el cilindro, se niveló la muestra con ayuda de una regla para eliminar el exceso de grano y asegurar un volumen exacto de 1 litro. Posteriormente, se colocó el cilindro medidor en la balanza y se registró el peso en kg hL⁻¹.

En los casos donde las muestras de grano no fueron suficientes para llenar el cilindro de 1 litro, se utilizó un cilindro de 0.5 litros, el peso obtenido se multiplicó por 2 para extrapolar a 1 litro.

Índices de sequía

Para los fines del presente estudio se estimaron los siguientes índices de sequía:

- 1) SSI (Índice de Susceptibilidad a la Sequía) propuesto por Fischer y Maurer (1978).
- 2) TOL (Índice de Tolerancia) propuesto por Rosielle y Hamblin (1981).
- 3) MP (Índice de Productividad Media) propuesto por Rosielle y Hamblin (1981).
- 4) STI (Índice de Tolerancia al Estrés Hídrico) descrito por Fernandez (1993).
- 5) YSI (Índice de Estabilidad de Rendimiento) propuesto por Bouslama y Schapaugh (1984).
- 6) DI (Índice de Resistencia a la Sequía) propuesto por Lan (1998).

Cada uno de los índices fue calculado con los datos obtenidos del rendimiento de grano correspondiente de los dos niveles de láminas de riego aplicados en cada localidad.

Validación de índices de sequía

Se realizaron análisis de regresión lineal simple entre los índices de sequía y el rendimiento de grano bajo las dos condiciones de lámina de riego. Este análisis permite cuantificar la proporción de la variabilidad del rendimiento en condiciones de estrés hídrico que puede ser explicada por cada índice. El modelo lineal utilizado fue el siguiente:

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

Donde:

Y_j = Valor del rendimiento bajo sequía

β_0 = Intercepto, es el valor esperado del rendimiento bajo sequía cuando el índice X_i es cero.

β_1 = Pendiente, indica el cambio promedio en el rendimiento bajo sequía por cada unidad adicional del índice X_i .

X_i = valor del índice de sequía

ε_i = error aleatorio asociado a esa observación, que recoge la variabilidad no explicada por el índice.

Etapa 2.1. Evaluación de 14 líneas avanzadas de trigo cristalino y la variedad CIRNO bajo dos niveles de lámina de riego en invernadero durante el ciclo O-I 2023-2024

El experimento se estableció en el invernadero # 2, de la UAAAN, en Saltillo, Coahuila, México. Se evaluaron las 14 líneas seleccionadas de trigo cristalino de la etapa 1 y la variedad CIRNO como testigo, la unidad experimental constituyó de una planta en maceta. Se evaluaron dos niveles de riego. Las variables para evaluar fueron: altura (ALT), longitud de espiga (LE), espiguillas por espiga (EE), granos por espiga (GE), peso de grano por espiga (PGE), peso de mil semillas (PMIL), número de tallos por planta (TPTA), días a espigamiento (DE), días a floración (DF), biomasa foliar (BF) y biomasa de la raíz (BRZ). La fecha de siembra se llevó a cabo el 18 de diciembre del 2023. Los tratamientos fueron distribuidos bajo un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas con dos bloques utilizando un modelo mixto para las variables evaluadas. En este análisis, el efecto de bloque se trató como aleatorio mientras que el efecto de líneas y riegos se trataron como fijos.

El modelo estadístico utilizado fue:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + R_j + (\tau \times R)_{ij} + \beta_k + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:

y_{ij} = Variable observada

μ = Efecto de la media general

τ_k = efecto de la k-ésima línea

R_j = efecto del l-ésimo riego

$(\tau \times R)_{ij}$ = efecto de la interacción de la i-ésima línea por el j-ésimo riego

β_k = efecto del k-ésimo bloque como efecto aleatorio

ε_{ijkl} = error: variación no explicada

Análisis estadísticos

Se realizaron análisis de varianza (ANOVA) con niveles de significancia de $p \leq 0.05$. y $p \leq 0.01$. Posteriormente, se realizaron comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey HSD (Tukey's Honestly Significant Difference). Además, se efectuaron análisis de correlación para explorar la relación entre las

variables morfo-fisiológicas y los índices de sequía. También se llevaron a cabo regresiones lineales para evaluar la influencia de los factores de estrés hídrico sobre el rendimiento de los genotipos y su relación con los índices de tolerancia a la sequía.

Los análisis de los datos obtenidos en este estudio se llevaron a cabo utilizando los programas estadísticos SAS 9.0 y RStudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la Etapa 1

Análisis del rendimiento de grano y sus componentes

En los cuadros 3 y 4 se presentan los resultados de los análisis de varianza (ANOVA) realizados para las variables estudiadas en la Etapa 1. Donde se encontraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre las líneas de trigo para rendimiento de grano (REND) y los componentes: granos por espiga (GPE), peso de granos por espiga (PGE), peso de grano individual (PGI), peso de mil semillas (PMIL), longitud de espiga (LE) y número de espigas por m² (EM2) y diferencias significativas para espiguillas por espiga (EE). Las diferencias observadas entre las líneas en las variables puede permitir la selección de genotipos superiores debido a que los componentes: número de granos por espiga, peso de granos por espiga, peso de grano individual, número de espigas por m² y peso de mil semillas son caracteres altamente heredables y con impacto positivo en el rendimiento final de grano del trigo cristalino (Slafer *et al.*, 2014; Fischer, 2007; Reynolds, 1996; Cossani y Reynolds, 2012; Zhou *et al.*, 2017; Giancaspro *et al.*, 2019; Ma *et al.*, 2007; Farokhzadeh *et al.*, 2020).

Cuadro 3. Análisis de varianza para rendimiento de grano y los componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino durante el ciclo P-V-2023.

FV	GL NUM	GL DEN	REND (kg ha ⁻¹)	GPE (granos· Espiga ⁻¹)	PGE (g)	PGI (g)	PMIL (g)	EM2 (espigas·m ⁻²)
LIN	48	48	225684	** 95.95	** 0.18	** 0.000062	** 61.38	** 1024.1
BLK	-	-	$\sigma^2=13872$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=76.8$
Test LRT (BLK)	-	-	$\chi^2= 7.12$ $p= 0.0076$	** $\chi^2= 0$ $p= 1$	ns $\chi^2= 0$ $p= 1$	ns $\chi^2= 0$ $p= 1$	ns $\chi^2= 0$ $p= 1$	ns $\chi^2= 4.76$ $p= 0.0290$

EE	-	-	$\sigma^2=64317$	$\sigma^2=34.73$	$\sigma^2=0.08$	$\sigma^2=2.3e-05$	$\sigma^2=23.34$	$\sigma^2=508.5$
C.V. (%)	-	-	31.68	23.96	31.51	12.72	12.79	23.71
Media			800.45	24.59	0.93	0.04	37.75	95.09

FV= fuentes de variación; LIN= líneas (efecto fijo); BLK= bloques (efecto aleatorio); EE= error experimental; C.V. (%) = coeficiente de variación; GL NUM= grados de libertad del numerador; GL DEN= grados de libertad del denominador; σ^2 = varianza; Test LRT (BLK): test de razón de verosimilitudes para bloques; REND= rendimiento de grano; GPE= granos por espiga; PGE= peso de granos por espiga; PGI= peso de grano individual; EM2= espigas por metro cuadrado; PMIL= peso de mil semillas; ^{ns}= no significancia; ^{**}=altamente significativo ($p \leq 0.01$); ^{*}= significativo ($p \leq 0.05$).

Para los caracteres morfo-fisiológicos, se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre líneas para NDVI y altamente significativas ($p \leq 0.01$) para DAF. Estas diferencias en NDVI y DAF pueden permitir seleccionar líneas superiores bajo condiciones de estrés debido al vigor del dosel y la duración de ciclo del cultivo (Reddy *et al.*, 2024; Araus y Cairns, 2014; Blum, 2011; Lopes y Reynolds, 2011).

Cuadro 4. Análisis de varianza para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino durante el ciclo P-V-2023.

FV	GL NUM	GL DEN	LE (cm)	EE (espiguillas* Espiga ⁻¹)	NDVI (NDVI)	ALT (cm)	DAF (días)
LIN	48	48	0.4616	** 4.3236	* 0.0065	* 35.169	ns 9.875
BLK	-	-	$\sigma^2=0.0004$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2= 0.0002$	$\sigma^2= 3.14$	$\sigma^2=0$
Test LRT (BLK)	-	-	$\chi^2= 0.010$ $p= 0.9165$	ns $\chi^2= 0$ $p= 1$	ns $\chi^2= 1.74$ $p= 0.1864$	ns $\chi^2= 3.54$ $p= 0.0497$	* $\chi^2= 0$ $p= 1$
EE	-	-	$\sigma^2=0.147$	$\sigma^2= 2.673$	$\sigma^2= 0.003$	$\sigma^2= 26.65$	$\sigma^2=3.388$
C.V. (%)	-	-	8.67	14.7	15.59	13.86	4.94
Media			4.42	11.12	0.40	37.23	80.57

FV= fuentes de variación; LIN= línea; BLK= bloques (efecto aleatorio); EE= error experimental; C.V. (%) = coeficiente de variación; GL NUM= grados de libertad del numerador; GL DEN= grados de libertad del denominador; σ^2 = varianza; Test LRT (BLK): test de razón de verosimilitudes para bloques; LE= longitud de espiga; EE= espiguillas por espiga; NDVI= índice de vegetación de diferencia normalizada; ALT= altura de planta; DAF= días a floración; ^{ns}= no significancia; ^{**}=altamente significativo ($p \leq 0.01$); ^{*}= significativo ($p \leq 0.05$).

Las pruebas de comparación de medias mostraron a las líneas 740, 705, 728, 715, 706, 716, 745, 713, 739, 748, 711, 736 y 738 las cuales registraron los rendimientos de grano más altos con valores que oscilaron entre 1005.5 y 1491.0 kg ha⁻¹. (Cuadro 5), resultado de la interacción favorable entre diversos componentes de rendimiento. Estas líneas combinaron un elevado número de

espigas por metro cuadrado (por ejemplo, la línea 706 con 138 espigas), un mayor peso de mil semillas (PMIL > 45 g en 716, 738, 706 y 739), y una buena capacidad de llenado de grano por espiga (PGE > 1.4 g en 740 y 716).

Con respecto a la mayor cantidad de GPE se registró en LIN 730 (38.5 granos), seguida de 708 y 748 (34.5 granos). Sin embargo, estas líneas no se ubicaron entre las de mayor rendimiento, lo que respalda la evidencia de que GPE, si bien es un componente importante del rendimiento, no lo determina de manera aislada, ya que su impacto se ve limitado sino se acompaña de un buen llenado y biomasa de soporte (Soriano *et al.*, 2018). Las líneas 741 y 702, con los GPE más bajos (8.0 y 4.0 granos, respectivamente), reflejan posibles problemas de fertilidad o formación de grano.

Las líneas 740 y 716 mostraron valores elevados de PGE (1.41 g), indicando una eficiente capacidad de llenado, lo que sugiere una mejor sincronización entre la demanda reproductiva y la capacidad fotosintética de la planta, lo cual permite alcanzar un mayor rendimiento final; esta eficiencia también se vio reflejada en el PMIL, con valores de 50.8 g para la línea 716, lo que indica uniformidad y peso adecuado del grano (Sayre *et al.*, 1997).

En relación con el peso de grano individual (PGI), los valores más altos lo exhibieron las líneas 716, 738, 706 y 739 (0.05 g) y el más bajo en la 720 con 0.02 g. En general, la mayoría de las líneas se encontraron en 0.04 g. Al respecto, de acuerdo con Reynolds *et al.* (2012), un mayor número de granos por espiga (GPE) puede reducir el PGI por competencia de asimilados durante el llenado estableciendo un equilibrio funcional entre ambos componentes.

Esta combinación de características ha demostrado ser clave para maximizar el rendimiento, ya que el efecto conjunto de EM2, PMIL, PGE y PGI permite un uso más eficiente de los recursos y una mayor estabilidad del cultivo (Fischer, 2007; Gaju *et al.*, 2011; Reynolds, 1996; Slafer *et al.*, 2014). Además, la mayoría de las líneas de mayor rendimiento también superaron los 38 g en peso de mil semillas (PMIL), una característica deseable por su asociación con el rendimiento y la calidad del grano (Gupta *et al.*, 2022; Slafer *et al.*, 2014).

A diferencia de otras líneas con valores extremos en un solo rasgo, como la línea 730 con alto número de granos por espiga (38.5 granos) pero bajo rendimiento, las líneas de mayor rendimiento mantuvieron un equilibrio funcional entre número de granos por espiga y peso de granos indicando una eficiente capacidad de llenado, lo cual es esencial para traducir el número de granos en producción efectiva (Reynolds *et al.*, 2012). Esto reafirma que el GPE requiere del soporte fisiológico necesario para traducirse en rendimiento real (Soriano *et al.*, 2018). Por otro lado, líneas como la 702, con bajo GPE (4.0 granos) y PGE (0.13 g) y la 720 con los valores más bajos de PGI (0.02 g) y PMIL (18.8 g), reflejan deficiencias fisiológicas como problemas de fertilidad o llenado de grano, lo que afecta directamente el rendimiento. Así, aunque ciertas líneas puedan destacar en un solo componente individual, no logran traducir ese rasgo en alto rendimiento si no está respaldado por una fisiología eficiente y estructura reproductiva balanceada.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se demostró que las líneas más rendidoras son aquellas que integran de forma coherente y funcional una densidad adecuada de espigas (EM2), un número moderado de GPE, buena capacidad de llenado (PGE y PGI), y un tamaño de grano uniforme y superior (PMIL). La expresión conjunta de estos atributos sugiere un equilibrio agronómico que favorece el aprovechamiento eficiente de los recursos bajo condiciones óptimas de cultivo, lo cual posiciona a dichas líneas como candidatas idóneas para avanzar a etapas posteriores de evaluación en condiciones de estrés hídrico.

Cuadro 5. Comparación de medias de los genotipos para rendimiento y sus componentes evaluados en el ciclo P-V-2023 en Navidad, Galeana, Nuevo León.

LIN	REND (kg ha ⁻¹)	LIN	GPE (granos· Espiga ⁻¹)	LIN	PGE (g)	LIN	PGI (g)	LIN	PMIL (g)	LIN	EM2 (espigas·m ²)
740	1491.0 ^a	730	38.50 ^a	710	1.45 ^a	716	0.05 ^a	716	50.80 ^a	741	145.50 ^a
705	1446.0 ^{ab}	708	34.50 ^{ab}	740	1.41 ^{ab}	738	0.05 ^{ab}	738	46.70 ^{ab}	724	138.50 ^{ab}
728	1397.0 ^{ab}	748	34.50 ^{ab}	716	1.41 ^{ab}	706	0.05 ^{abc}	706	46.40 ^{abc}	706	138.00 ^{ab}
715	1303.0 ^{abc}	710	34.00 ^{ab}	730	1.39 ^{abc}	739	0.05 ^{a-d}	739	45.50 ^{a-d}	726	136.00 ^{abc}
706	1291.0 ^{a-d}	749	33.50 ^{abc}	728	1.36 ^{a-d}	715	0.04 ^{a-e}	715	44.10 ^{a-e}	736	135.00 ^{a-d}
716	1286.5 ^{a-e}	740	32.50 ^{a-d}	715	1.32 ^{a-e}	709	0.04 ^{a-f}	709	43.10 ^{a-f}	733	131.50 ^{a-e}
745	1224.0 ^{a-f}	728	32.00 ^{a-e}	748	1.31 ^{a-e}	726	0.04 ^{a-g}	710	42.90 ^{a-g}	713	126.00 ^{a-f}
713	1143.5 ^{a-g}	711	31.00 ^{a-f}	739	1.28 ^{a-f}	710	0.04 ^{a-g}	727	42.30 ^{a-h}	725	117.00 ^{a-g}
739	1135.5 ^{a-g}	715	30.00 ^{a-g}	738	1.25 ^{a-f}	728	0.04 ^{a-g}	726	42.30 ^{a-h}	718	115.50 ^{a-h}
748	1106.5 ^{a-g}	707	29.50 ^{a-h}	711	1.21 ^{a-g}	727	0.04 ^{a-g}	728	42.20 ^{a-h}	705	115.00 ^{a-i}
711	1086.5 ^{a-g}	718	29.50 ^{a-h}	705	1.17 ^{a-h}	740	0.04 ^{a-h}	714	41.70 ^{a-i}	735	112.00 ^{a-j}
736	1052.5 ^{a-h}	723	29.50 ^{a-h}	727	1.11 ^{a-i}	714	0.04 ^{a-h}	740	41.10 ^{a-j}	740	111.50 ^{a-j}
738	1005.5 ^{a-i}	705	29.50 ^{a-h}	714	1.10 ^{a-i}	713	0.04 ^{a-i}	713	41.00 ^{b-j}	727	105.00 ^{a-j}
749	978.0 ^{b-j}	739	28.50 ^{a-i}	736	1.08 ^{a-i}	746	0.04 ^{b-i}	732	40.70 ^{b-j}	716	103.00 ^{a-j}
725	976.0 ^{b-j}	745	27.50 ^{a-j}	723	1.06 ^{a-i}	732	0.04 ^{b-i}	746	40.50 ^{b-j}	709	102.00 ^{a-j}
722	971.5 ^{b-j}	719	27.50 ^{a-j}	707	1.06 ^{a-i}	717	0.04 ^{b-i}	722	40.30 ^{b-j}	745	102.00 ^{a-j}
707	966.0 ^{b-j}	716	27.50 ^{a-j}	726	1.06 ^{a-i}	736	0.04 ^{b-j}	735	40.20 ^{b-j}	721	101.00 ^{a-j}
710	958.0 ^{b-k}	712	27.50 ^{a-j}	719	1.06 ^{a-i}	735	0.04 ^{b-j}	717	40.20 ^{b-j}	734	101.00 ^{a-j}
730	828.5 ^{c-l}	703	27.50 ^{a-j}	706	1.03 ^{a-i}	722	0.04 ^{b-j}	736	39.90 ^{b-k}	707	99.00 ^{b-j}
735	828.0 ^{c-l}	736	27.00 ^{a-j}	708	1.02 ^{a-i}	705	0.04 ^{b-k}	705	39.50 ^{b-k}	747	99.00 ^{b-j}
712	823.0 ^{c-l}	743	27.00 ^{a-j}	722	1.02 ^{a-i}	741	0.04 ^{b-k}	741	39.20 ^{b-k}	728	95.50 ^{b-k}
714	812.0 ^{c-l}	738	26.50 ^{a-j}	712	1.00 ^{a-i}	734	0.04 ^{b-k}	734	39.20 ^{b-k}	715	93.50 ^{b-k}
718	812.0 ^{c-l}	727	26.00 ^{b-k}	703	0.99 ^{a-i}	729	0.04 ^{b-k}	729	38.90 ^{b-l}	732	92.50 ^{c-k}
723	803.0 ^{c-l}	714	26.00 ^{b-k}	718	0.98 ^{a-i}	711	0.04 ^{b-k}	711	38.90 ^{b-l}	731	90.50 ^{d-k}
750	798.0 ^{c-l}	725	26.00 ^{b-k}	725	0.95 ^{a-i}	702	0.04 ^{b-l}	702	38.80 ^{b-l}	708	90.00 ^{d-k}
719	788.0 ^{d-l}	726	25.50 ^{b-k}	709	0.94 ^{a-i}	719	0.04 ^{b-l}	731	38.20 ^{b-l}	704	90.00 ^{d-k}
727	778.0 ^{e-l}	722	25.50 ^{b-k}	745	0.93 ^{a-i}	748	0.04 ^{b-l}	719	38.00 ^{b-l}	750	90.00 ^{d-k}
703	763.5 ^{f-m}	724	24.50 ^{b-k}	746	0.92 ^{a-i}	731	0.04 ^{b-l}	748	37.90 ^{b-l}	739	89.50 ^{e-k}
724	738.0 ^{f-m}	750	24.00 ^{b-k}	724	0.92 ^{a-i}	724	0.04 ^{c-m}	724	37.00 ^{c-m}	744	89.00 ^{e-k}
709	733.5 ^{f-m}	704	24.00 ^{b-k}	713	0.91 ^{a-i}	725	0.04 ^{d-m}	725	36.80 ^{c-m}	714	88.00 ^{e-k}
708	732.0 ^{f-m}	742	23.00 ^{b-k}	749	0.90 ^{a-j}	712	0.04 ^{d-m}	712	36.70 ^{c-m}	712	87.50 ^{e-k}
743	669.5 ^{g-n}	733	23.00 ^{b-k}	743	0.89 ^{a-k}	730	0.04 ^{d-m}	723	36.00 ^{d-m}	749	86.50 ^{e-k}
704	659.0 ^{g-n}	713	22.00 ^{c-k}	729	0.84 ^{b-k}	723	0.04 ^{d-m}	730	35.70 ^{e-m}	723	85.00 ^{f-l}
734	572.0 ^{h-n}	706	21.50 ^{d-k}	717	0.81 ^{c-k}	737	0.04 ^{e-m}	707	35.50 ^{e-m}	722	83.00 ^{f-l}
731	544.5 ^{h-o}	746	21.50 ^{d-k}	750	0.80 ^{c-k}	707	0.04 ^{e-m}	703	35.50 ^{e-m}	742	81.50 ^{f-l}
747	533.0 ^{i-o}	709	21.50 ^{d-k}	732	0.80 ^{d-k}	703	0.04 ^{e-m}	737	35.40 ^{e-m}	711	81.00 ^{f-l}
746	524.0 ^{i-o}	729	21.00 ^{d-l}	735	0.78 ^{d-k}	733	0.03 ^{f-m}	733	34.00 ^{f-m}	717	80.00 ^{g-l}
737	520.0 ^{i-o}	717	20.50 ^{e-l}	733	0.77 ^{d-k}	750	0.03 ^{f-m}	750	33.80 ^{f-m}	748	79.50 ^{g-l}
732	506.0 ^{i-o}	737	19.50 ^{f-m}	742	0.76 ^{e-k}	718	0.03 ^{f-m}	718	33.60 ^{f-m}	729	78.50 ^{g-l}
733	506.0 ^{i-o}	732	19.50 ^{f-m}	704	0.74 ^{e-k}	744	0.03 ^{g-m}	743	33.20 ^{g-m}	738	77.50 ^{g-l}
742	499.0 ^{j-o}	744	19.00 ^{g-m}	737	0.71 ^{f-l}	743	0.03 ^{g-m}	744	33.10 ^{h-m}	746	77.00 ^{g-l}
744	472.0 ^{j-o}	735	19.00 ^{g-m}	744	0.65 ^{g-l}	742	0.03 ^{g-m}	742	33.10 ^{h-m}	743	74.00 ^{g-l}
726	455.0 ^{k-o}	747	18.00 ^{h-m}	731	0.63 ^{g-l}	745	0.03 ^{h-m}	745	32.10 ^{i-m}	703	72.00 ^{g-l}
741	447.5 ^{l-o}	720	17.00 ^{i-m}	734	0.58 ^{h-l}	721	0.03 ^{i-m}	721	31.60 ^{j-m}	730	71.50 ^{h-l}
717	429.5 ^{l-o}	731	16.50 ^{j-n}	747	0.54 ^{i-l}	704	0.03 ^{j-m}	747	30.30 ^{klm}	719	71.00 ^{h-l}
721	341.5 ^{l-o}	734	14.50 ^{k-n}	741	0.32 ^{j-l}	747	0.03 ^{k-m}	704	30.30 ^{klm}	737	70.00 ^{i-l}
729	259.0 ^{m-o}	721	9.50 ^{lmn}	720	0.32 ^{j-l}	708	0.03 ^{lm}	708	29.40 ^{lm}	710	68.00 ^{j-l}
720	172.0 ^{no}	741	8.00 ^{mn}	721	0.31 ^{k-l}	749	0.03 ^{mn}	749	27.90 ^{mn}	720	53.50 ^{k-l}
702	57.5 ^o	702	4.00 ⁿ	702	0.13 ^l	720	0.02 ⁿ	720	18.80 ⁿ	702	40.50 ^l

LIN= línea; REND= rendimiento de grano; GPE= granos por espiga; PGE= peso de grano por espiga; PGI= peso de grano individual; PMIL= peso de mil semillas; EM2= espigas por metro cuadrado. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Análisis de caracteres morfo-fisiológicos

Los caracteres morfo-fisiológicos evaluados en esta etapa aportaron información valiosa sobre la base funcional del rendimiento observado en las líneas más productivas. Variables como NDVI, altura de planta, días a floración y los atributos de longitud de espiga y espiguillas por espiga permitieron identificar genotipos con un balance adecuado entre crecimiento vegetativo, eficiencia fisiológica y arquitectura reproductiva, elementos fundamentales para la selección.

El NDVI fue uno de los caracteres que mejor explicó la capacidad fotosintética y el vigor del dosel en las líneas de mayor rendimiento. Las líneas 705 (0.53 unidades NDVI), 728 (0.51 unidades NDVI) y 745 (0.50 unidades NDVI) pertenecientes al grupo de alto rendimiento, presentaron los valores más altos de NDVI (Cuadro 6), lo que sugiere una mayor actividad fotosintética y acumulación de biomasa, factores directamente relacionados con la capacidad de llenado de grano y la eficiencia del cultivo (Kyratzis *et al.*, 2017; Shen y Evans, 2021). Estos resultados coinciden con lo reportado por Moayedi *et al.* (2010), quienes identificaron un NDVI > 0.50 como umbral asociado a genotipos con mejor desempeño bajo condiciones óptimas. En contraste, líneas como 702 (0.22 unidades NDVI) y 720 (0.29 unidades NDVI), con bajo NDVI, mostraron una limitada expresión vegetativa y un bajo rendimiento, lo que indica restricciones fisiológicas.

La altura de planta (Cuadro 6) también evidenció correspondencia con el NDVI y con el rendimiento de grano. La línea 716 destacó por su mayor altura (49.0 cm), seguida por las líneas 740 (45.0 cm), 728 (43.5 cm) y 705 (43.0 cm), todas ellas clasificadas entre las de mayor rendimiento. Estas líneas presentaron buen nivel de altura, lo que sugiere una arquitectura equilibrada que favorece una adecuada interceptación de luz, sin incurrir en riesgos de acame ni en un gasto excesivo de recursos estructurales (Mohi-Ud-Din *et al.*, 2022).

En cuanto a la duración de las etapas fenológicas, se observaron diferencias de hasta 7 días para alcanzar la floración. Entre las líneas de mayor rendimiento, las más precoces fueron la 706, 713 y 716, las cuales alcanzaron una floración más temprana de 77 días (Cuadro 6), lo que representa una ventaja adaptativa bajo

condiciones de estrés hídrico terminal, ya que permite terminar el ciclo reproductivo antes de la aparición de condiciones adversas (Passioura y Angus, 2010; Mdluli, 2018).

Respecto a la arquitectura de la espiga, las líneas 709 y 748 destacaron por su mayor longitud (5.46 cm) y número de espiguillas (14 espiguillas), respectivamente, seguidas por la línea 740 (13.5 espiguillas), la cual también forma parte del grupo de mayor rendimiento. Estas características estructurales son importantes, ya que una espiga más larga y con mayor número de espiguillas ofrece más sitios fértiles para la formación de granos, incrementando el potencial de rendimiento (Moayedi *et al.*, 2010). Por el contrario, la línea 702, con uno de los menores valores de longitud de espiga (3.75 cm) y el menor número de espiguillas (8 espiguillas), mostró un bajo rendimiento, lo que evidencia una arquitectura reproductiva limitada.

Al integrar los resultados, se observa que las líneas más rendidoras como 705, 728, 739 y 740, comparten un perfil morfo-fisiológico favorable: alto NDVI, arquitectura eficiente, precocidad relativa y buena estructura de espiga, lo que confiere una ventaja tanto bajo condiciones óptimas como en escenarios de estrés hídrico. Estas líneas presentan un equilibrio funcional que permite un aprovechamiento más eficiente de los recursos, manteniendo un desarrollo vegetativo vigoroso sin sacrificar la eficiencia reproductiva.

En conjunto, estos resultados respaldan el valor de los caracteres morfo-fisiológicos como criterios de selección complementarios a los componentes de rendimiento. Su inclusión en etapas tempranas de selección permite identificar genotipos con alta plasticidad fenotípica, mejor adaptabilidad y mayor potencial de rendimiento sostenido en ambientes adversos (Kyratzis *et al.*, 2017; Mdluli, 2018).

Cuadro 6. Comparación de medias de las líneas para los caracteres morfo-fisiológicos evaluados en el ciclo P-V-2023 en Navidad, Galeana, Nuevo León.

LIN	NDVI (NDVI)	LIN	ALT (cm)	LIN	DAF (días)	LIN	LE (cm)	LIN	EE (Espiguillas•Espiga ⁻¹)
705	0.53 ^a	716	49.00 ^a	739	84 ^a	709	5.46 ^a	748	14.00 ^a
728	0.51 ^{ab}	740	45.00 ^{ab}	745	83 ^{ab}	703	5.35 ^{ab}	710	14.00 ^a
745	0.50 ^{abc}	728	43.50 ^{abc}	737	83 ^{ab}	736	5.25 ^{abc}	740	13.50 ^{ab}
748	0.48 ^{a-d}	705	43.00 ^{a-d}	731	83 ^{ab}	740	5.15 ^{a-d}	727	13.00 ^{abc}
739	0.48 ^{a-d}	745	42.50 ^{a-e}	730	83 ^{ab}	714	5.13 ^{a-d}	716	13.00 ^{abc}
713	0.48 ^{a-e}	739	42.00 ^{a-e}	725	83 ^{ab}	711	5.05 ^{a-e}	730	12.50 ^{a-d}
716	0.47 ^{a-f}	709	41.50 ^{a-f}	723	83 ^{ab}	722	4.96 ^{a-f}	726	12.50 ^{a-d}
714	0.47 ^{a-f}	741	41.00 ^{a-f}	714	83 ^{ab}	746	4.96 ^{a-f}	722	12.50 ^{a-d}
726	0.45 ^{a-g}	708	41.00 ^{a-f}	704	83 ^{ab}	739	4.95 ^{a-f}	728	12.50 ^{a-d}
706	0.45 ^{a-h}	730	40.50 ^{a-f}	749	82 ^{ab}	715	4.85 ^{a-g}	719	12.50 ^{a-d}
715	0.45 ^{a-h}	725	40.00 ^{a-f}	748	82 ^{ab}	712	4.85 ^{a-g}	718	12.50 ^{a-d}
725	0.44 ^{a-h}	715	39.50 ^{a-f}	747	82 ^{ab}	727	4.80 ^{a-g}	714	12.50 ^{a-d}
740	0.44 ^{a-h}	750	39.50 ^{a-f}	742	82 ^{ab}	726	4.80 ^{a-g}	703	12.50 ^{a-d}
736	0.44 ^{a-h}	736	39.50 ^{a-f}	740	82 ^{ab}	704	4.75 ^{a-h}	749	12.00 ^{a-d}
722	0.44 ^{a-h}	722	39.50 ^{a-f}	738	82 ^{ab}	749	4.65 ^{b-i}	715	12.00 ^{a-d}
741	0.43 ^{a-h}	713	39.50 ^{a-f}	736	82 ^{ab}	742	4.65 ^{b-i}	711	12.00 ^{a-d}
733	0.42 ^{a-h}	710	39.50 ^{a-f}	734	82 ^{ab}	705	4.60 ^{b-j}	708	12.00 ^{a-d}
730	0.42 ^{a-h}	714	39.00 ^{a-f}	729	82 ^{ab}	748	4.60 ^{b-j}	705	12.00 ^{a-d}
735	0.42 ^{a-h}	707	39.00 ^{a-f}	728	82 ^{ab}	728	4.55 ^{c-j}	739	11.50 ^{a-e}
709	0.41 ^{a-i}	748	38.50 ^{b-f}	727	82 ^{ab}	730	4.50 ^{c-k}	729	11.50 ^{a-e}
727	0.40 ^{a-i}	706	38.50 ^{b-f}	724	82 ^{ab}	725	4.43 ^{d-k}	725	11.50 ^{a-e}
711	0.40 ^{a-i}	749	38.00 ^{b-f}	720	82 ^{ab}	717	4.40 ^{d-l}	723	11.50 ^{a-e}
724	0.40 ^{b-i}	746	37.50 ^{b-f}	715	82 ^{ab}	710	4.40 ^{d-l}	712	11.50 ^{a-e}
749	0.40 ^{b-i}	738	37.00 ^{b-f}	711	82 ^{ab}	741	4.40 ^{d-l}	707	11.50 ^{a-e}
708	0.40 ^{b-i}	712	37.00 ^{b-f}	705	82 ^{ab}	716	4.40 ^{d-l}	704	11.50 ^{a-e}
710	0.39 ^{b-i}	735	36.50 ^{b-f}	703	82 ^{ab}	737	4.38 ^{d-l}	733	11.00 ^{a-f}
719	0.39 ^{b-i}	721	36.50 ^{b-f}	702	82 ^{ab}	724	4.35 ^{e-l}	717	11.00 ^{a-f}
712	0.39 ^{b-i}	703	36.50 ^{b-f}	750	79.5 ^{bc}	723	4.35 ^{e-l}	706	11.00 ^{a-f}
738	0.39 ^{b-i}	718	36.00 ^{b-f}	746	79.5 ^{bc}	718	4.35 ^{e-l}	737	10.50 ^{b-f}
718	0.39 ^{b-i}	727	35.50 ^{b-f}	744	79.5 ^{bc}	738	4.32 ^{e-l}	750	10.50 ^{b-f}
704	0.39 ^{b-i}	717	35.50 ^{b-f}	743	79.5 ^{bc}	708	4.30 ^{e-l}	747	10.50 ^{b-f}
723	0.39 ^{b-i}	737	35.00 ^{b-f}	733	79.5 ^{bc}	719	4.30 ^{e-l}	744	10.50 ^{b-f}
707	0.38 ^{c-i}	723	35.00 ^{b-f}	722	79.5 ^{bc}	734	4.22 ^{f-m}	743	10.50 ^{b-f}
746	0.38 ^{c-i}	744	34.50 ^{c-f}	719	79.5 ^{bc}	707	4.20 ^{f-n}	738	10.50 ^{b-f}
721	0.38 ^{c-i}	743	34.50 ^{c-f}	712	79.5 ^{bc}	729	4.20 ^{f-n}	724	10.50 ^{b-f}
717	0.37 ^{c-i}	731	34.50 ^{c-f}	710	79.5 ^{bc}	735	4.16 ^{g-n}	709	10.50 ^{b-f}
750	0.37 ^{c-i}	704	34.50 ^{c-f}	709	79.5 ^{bc}	750	4.00 ^{h-n}	742	10.00 ^{c-f}
737	0.37 ^{c-i}	747	34.00 ^{c-f}	708	79.5 ^{bc}	744	4.00 ^{h-n}	735	10.00 ^{c-f}
747	0.37 ^{d-i}	726	34.00 ^{c-f}	707	79.5 ^{bc}	743	4.00 ^{h-n}	746	9.50 ^{d-f}
743	0.36 ^{d-i}	724	34.00 ^{c-f}	741	77 ^c	713	3.95 ⁱ⁻ⁿ	741	9.50 ^{d-f}
703	0.36 ^{d-i}	711	34.00 ^{c-f}	735	77 ^c	745	3.95 ⁱ⁻ⁿ	745	9.50 ^{d-f}
729	0.36 ^{d-i}	719	33.50 ^{c-g}	732	77 ^c	733	3.95 ⁱ⁻ⁿ	734	9.50 ^{d-f}
734	0.35 ^{e-i}	732	33.50 ^{c-g}	726	77 ^c	720	3.90 ⁱ⁻ⁿ	731	9.50 ^{d-f}
742	0.35 ^{f-j}	742	33.00 ^{d-g}	721	77 ^c	706	3.88 ⁱ⁻ⁿ	720	9.50 ^{d-f}
744	0.34 ^{g-j}	734	33.00 ^{d-g}	718	77 ^c	732	3.85 ⁱ⁻ⁿ	713	9.50 ^{d-f}
732	0.34 ^{g-j}	729	33.00 ^{d-g}	717	77 ^c	702	3.75 ^{k-n}	736	8.50 ^{e-f}
731	0.32 ^{hij}	733	32.50 ^{efg}	716	77 ^c	731	3.65 ^{lmn}	732	8.50 ^{e-f}
720	0.29 ^{ij}	720	31.50 ^{fg}	713	77 ^c	721	3.49 ^{mn}	721	8.50 ^{e-f}
702	0.22 ^j	702	23.50 ^g	706	77 ^c	747	3.45 ⁿ	702	8.00 ^f

LIN= línea; LE= longitud de espiga; EE= espiguillas por espiga; NDVI=índice de vegetación de diferencia normalizada; ALT= altura de planta; DAF= días a floración. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Análisis de correlación entre rendimiento de grano, sus componentes y caracteres morfo-fisiológicos

El análisis de varianza y la correlación de Pearson entre REND y los caracteres evaluados: PGE, NDVI, ALT, GPE, EE, PGI, PMIL, LE y EM2 mostraron asociaciones estadísticamente significativas que permiten identificar los rasgos con mayor influencia sobre la productividad en las líneas de trigo cristalino (Cuadro 7).

Los caracteres que mostraron una mayor asociación positiva con el rendimiento de grano fueron el peso de grano por espiga (PGE, $r= 0.791$), el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, $r= 0.785$) y la altura de planta (ALT, $r= 0.765$), todos altamente significativos ($p \leq 0.01$), lo que refleja la influencia conjunta de una arquitectura eficiente, buena capacidad de llenado y una alta actividad fotosintética (Cuadro 7). Estos rasgos, directamente relacionados con el vigor vegetativo y el estado fisiológico del cultivo, han sido ampliamente reconocidos como predictores del rendimiento en trigo bajo condiciones óptimas (Reynolds, 1996; Kyrtzis *et al.*, 2017).

Cuadro 7. Análisis de varianza y correlación de Pearson entre rendimiento y caracteres evaluados de líneas de trigo cristalino P-V-2023 en Navidad, Galeana, Nuevo León.

FV	GL	PGE (g)	NDVI (Unidades NDVI)	ALT (cm)	GPE (granos*espiga ⁻¹)	EE (espiguillas*espiga ⁻¹)	PGI (g)	PMIL (g)	LE (cm)	EM2 (espigas*m ²)	DAF (días)
REND	1	3387582 **	3334065 **	3172588 **	2487293 **	1369132 **	1090299 **	1067593 **	754097 **	487098 **	89823 ns
error	47	43167	44305	47741	62322	86112	92045	92528	99198	104879	113332
r		0.791	0.785	0.765	0.678	0.503	0.449	0.444	0.373	0.300	0.129

FV= Fuentes de variación; REND= rendimiento de grano; Residual= residual; r= coeficiente de correlación; GL= grados de libertad; PGE= peso de granos por espiga; NDVI= índice de vegetación de diferencia normalizada; ALT= altura de planta; GPE= granos por espiga; EE= espiguillas por espiga; PGI= peso de grano individual; PMIL= peso de mil semillas; LE= longitud de espiga; EM2= espigas por metro cuadrado; DAF= días a floración; ^{ns}= no significancia; **=altamente significativo ($p \leq 0.01$); *= significativo ($p \leq 0.05$).

Adicionalmente, se identificó una correlación positiva entre la arquitectura de la espiga y el rendimiento (Cuadro 7), ya que variables como el GPE y EE mostraron asociaciones significativas, esto sugiere que una mayor cantidad de estructuras fértiles por espiga puede traducirse en una mayor capacidad de producción (Moayedi *et al.*, 2010). No obstante, otros caracteres como el PGI y el PMIL presentaron correlaciones más moderadas, esto debido a la compensación fisiológica entre el número y el tamaño de granos durante el llenado (Sayre *et al.*, 1997).

Por otro lado, características como LE y EM2 mostraron asociaciones más débiles con el rendimiento, debido a la dependencia de otros factores, sobre todo por la fertilidad de espiga o el índice de cosecha (Fischer, 2007). Por su parte, los días a floración no mostraron una relación significativa, lo cual es consistente con la ausencia de condiciones de estrés terminal en el ciclo evaluado; sin embargo, en ambientes restrictivos, la precocidad puede representar una ventaja adaptativa (Passioura y Angus, 2010; Mohi-Ud-Din *et al.*, 2022).

En conjunto, estos resultados indican que los caracteres morfo-fisiológicos más relacionados con el rendimiento no actúan de manera aislada, sino que su contribución se potencia cuando coexisten en un adecuado desarrollo estructural, alta eficiencia fotosintética y buena captación de llenado de grano, por tanto, variables como PGE, NDVI, ALT, GPE, EE, PGI y PMIL, destacan como criterios clave para la identificación de líneas superiores en los programas de mejoramiento genético de trigo cristalino.

Resultados de la Etapa 2

Análisis de rendimiento de grano, sus componentes y caracteres morfo-fisiológicos

En los Cuadros 8 y 9 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para el rendimiento de grano, sus componentes y los caracteres morfo-fisiológicos evaluados. La interacción triple Localidad x Riego x Línea (L x R x G) no fue estadísticamente significativa para ninguna de las variables, lo que

sugiere que la respuesta de los genotipos fue consistente ante las distintas combinaciones de ambientes y niveles de riego. Esta estabilidad en la respuesta implica que los genotipos no modificaron sustancialmente su desempeño ante los diferentes entornos evaluados, lo cual es deseable en programas de selección de cultivares para ambientes con estrés hídrico (Wang *et al.*, 2024).

En cuanto a las interacciones dobles, no se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para Línea x Riego (G x R) ni para Línea x Localidad (G x L) en la mayoría de los componentes de rendimiento (Cuadro 8). No obstante, se identificaron interacciones específicas de relevancia, tales como: Localidad x Riego (L x R), que resultó significativa ($p \leq 0.05$) para PGE y PMIL, indicando que la respuesta de estos componentes a los niveles de riego varía entre localidades. Asimismo, G x L mostró efectos significativos ($p \leq 0.05$) para PGE y altamente significativos ($p \leq 0.01$) para PMIL, lo que sugiere que algunas líneas responden de forma diferente según la localidad.

Aunque estas interacciones fueron significativas, en general se evidencia una baja interacción genotipo x ambiente (IGA). Esto refleja una respuesta estable de las líneas frente a variaciones en el manejo hídrico y en las condiciones edafoclimáticas. La baja interacción IGA facilita la identificación de genotipos con comportamiento consistente y confiable, aspecto clave para zonas áridas donde la estabilidad del rendimiento es prioritaria (Cooper *et al.*, 2020).

Respecto a los efectos simples (Cuadros 8 y 9), se observaron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre las líneas de trigo cristalino para variables GE, PHL, PMIL, LE y EE. También se registraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para EM2. Estos resultados destacan la diversidad genética presente en el material evaluado y confirman el potencial de selección bajo condiciones de déficit hídrico controlado.

Además, se identificaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre localidades (Galeana, N.L. y Zaragoza, Coah.) para el rendimiento de grano, peso hectolítrico y peso de mil semillas, atribuibles a variaciones en condiciones edafoclimáticas como tipo de suelo, altitud y temperatura. Aunque el presente estudio no se desarrolló en las mismas regiones, Bayissa *et al.* (2023) reportaron que, en

ambientes contrastantes de Etiopía, las diferencias ambientales explicaron hasta un 15% de la variación en el rendimiento, subrayando la influencia del entorno sobre la productividad en zonas semiáridas.

En cuanto al factor riego, se observó un efecto significativo ($p \leq 0.01$) sobre REND y PHL (Cuadro 8), mientras que el resto de los componentes permaneció estadísticamente estable, incluso bajo la lámina de riego más baja (0.33 m). Wang *et al.* (2018) reportaron un patrón similar en la llanura norte de China, donde una reducción del 20% en el volumen de riego condujo a una disminución del 8% en el rendimiento. Esto se explica porque el cultivo puede mantener niveles productivos aceptables con menor volumen de agua disponible, al reducirse las pérdidas por evaporación y optimizarse el uso del recurso hídrico.

Cuadro 8. Análisis de varianza del rendimiento de grano y sus componentes en líneas de trigo cristalino, evaluadas bajo dos niveles de riego en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

FV	GL NUM	GL DEN	REND (kg ha ⁻¹)	GE (granos•Espiga ⁻¹)	PGE (g)	PHL (kg hL ⁻¹)	PMIL (g)	EM2 (espigas•m ⁻²)						
LOC	1	4	2179486.00 *	81.24	ns	0.1798	ns	349.95 *	210.17 *	192.10	ns			
RG	1	4	1830358.00 **	82.47	ns	0.5354	ns	708.39 **	89.93	ns	442.22	ns		
LOC x RG	1	4	80182.00	ns	80.18	ns	1.0597	*	26.47	ns	255.83	*	2018.32	ns
BLK (error1) (LOC:RG:BLK)	-	-	$\sigma^2=59023.00$	$\sigma^2=21.83$	$\sigma^2=0.0218$	$\sigma^2=0.64$	$\sigma^2=2.78$	$\sigma^2=317.90$						
Test LRT (BLK)	-	-	$\chi^2= 9.90$ $p= 0.0016$	$\chi^2= 6.95$ $p= 0.0083$	$\chi^2= 5.61$ $p= 0.017$	$\chi^2= 0.37$ $p= 0.532$	$\chi^2= 4.35$ $p= 0.037$	$\chi^2= 12.74$ $p= 0.00035$						
LIN	14	56	258200.00	ns	274.34	**	0.1086	ns	47.08	**	128.65	**	1523.51	*
LOC x LIN	14	56	164263.00	ns	130.16	ns	0.2496	*	29.45	ns	42.27	**	931.70	ns
RG x LIN	14	56	194273.00	ns	108.12	ns	0.1032	ns	14.96	ns	9.08	ns	1308.63	ns
LOC x RG x LIN	14	56	207741.00	ns	92.30	ns	0.1279	ns	31.05	ns	8.67	ns	1218.28	ns
EE (error 2)	-	-	$\sigma^2=180036.00$	$\sigma^2=89.29$	$\sigma^2=0.1058$	$\sigma^2=18.3$	$\sigma^2=16.34$	$\sigma^2=775.20$						
C.V. (%)	-	-	27.75	17.58	18.81	6.31	12.38	22.72						
MEDIA	-	-	1529.02	53.74	1.73	67.90	32.66	122.55						

FV= fuentes de variación; LOC= localidades; RG=riegos; LIN= líneas; BLK (LOC: RG: BLK) = bloques anidados dentro de cada combinación de localidad por riego; Test LRT (BLK): test de razón de verosimilitudes para bloques. Interacciones: LOC x RG= localidades por riegos; LOC x LIN= localidades por líneas; RG x LIN= riegos por líneas; LOC x RG x LIN= localidades por riegos por líneas; EE= error experimental; C.V (%) = coeficiente de variación; GL NUM= grados de libertad del numerador; GL DEN= grados de libertad del denominador; REND= rendimiento de grano; GPE= granos por espiga; PGE= peso de granos por espiga; PHL= peso hectolítrico; PMIL= peso de mil semillas; EM2= espigas por metro cuadrado; σ^2 = varianza; ns= no significancia; **=altamente significativo ($p \leq 0.01$); *= significativo ($p \leq 0.05$).

Para los caracteres morfo-fisiológicos (Cuadro 9), las variables ALT y TEM presentaron efectos de localidad altamente significativos ($p \leq 0.01$), mientras que la variación genotípica entre líneas y la interacción L x G, ALT alcanzó significancia ($p \leq 0.05$). Por su parte, no se encontraron diferencias significativas para NDVI. Estos resultados reflejan una marcada influencia de las condiciones edafo-climáticas sobre la elongación del tallo y temperatura, así como diferencias y respuestas específicas de cada línea en entornos contrastantes. En concordancia con Bocianowski *et al.* (2021) atribuyeron más del 30% de la variación de altura y temperatura en triticale a factores ambientales.

Cuadro 9. Análisis de varianza para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino evaluadas bajo dos niveles de riego en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

FV	GL NUM	GL DEN	ALT (cm)		NDVI (unidades NDVI)		TEM (°C)		LE (cm)		EE (espiguillas* Espiga ⁻¹)	
LOC	1	4	1557.74	**	0.0223	ns	343.66	**	0.2524	ns	15.59	*
RG	1	4	51.18	ns	0.0060	ns	16.81	ns	0.0129	ns	5.44	ns
LOC x RG	1	4	119.88	ns	0.0286	ns	51.55	*	0.1430	ns	2.44	ns
BLK (error1) (LOC:RG:BLK)	-	-	$\sigma^2=11.24$	**	$\sigma^2=0.0031$	**	$\sigma^2=0.63$	*	$\sigma^2=0.0343$	**	$\sigma^2=0.327$	**
Test LRT (BLK)	-	-	$\chi^2= 12.12$ $p= 0.00049$		$\chi^2= 17.67$ $p= 2.623e-05$		$\chi^2= 4.30$ $p= 0.0379$		$\chi^2= 8.02$ $p= 0.0046$		$\chi^2= 11.42$ $p= 0.00072$	
LIN	14	56	65.19	*	0.0085	ns	3.47	ns	2.6276	**	4.05	**
LOC x LIN	14	56	52.43	*	0.0073	ns	3.02	ns	0.2225	ns	3.16	**
RG x LIN	14	56	11.06	ns	0.0097	ns	7.94	*	0.2165	ns	1.47	ns
LOC x RG x LIN	14	56	31.59	ns	0.0073	ns	3.21	ns	0.1869	ns	1.06	ns
EE (error 2)	-	-	$\sigma^2=28.71$		$\sigma^2=0.0056$		$\sigma^2=3.74$		$\sigma^2=0.1249$		$\sigma^2=0.879$	
C.V. (%)	-	-	7.54		11.63		8.17		5.24		5.21	
MEDIA	-	-	71.05		0.64		23.67		6.73		18.00	

FV= fuentes de variación; LOC= localidades; RG= riegos; LIN= líneas; BLK (LOC: RG: BLK) = bloques anidados dentro de cada combinación de localidad por riego; Test LRT (BLK): test de razón de verosimilitudes para bloques. Interacciones: LOC x RG= localidades por riegos; LOC x LIN= localidades por líneas; RG x LIN= riegos por líneas; LOC x RG x LIN= localidades por riegos x líneas; EE= error experimental; C.V. (%) = coeficiente de variación; GL NUM= grados de libertad del numerador; GL DEN= grados de libertad del denominador; σ^2 = varianza; ALT= altura de planta; NDVI= índice de vegetación de diferencia normalizada; TEM= temperatura; LE= longitud de espiga; EE= espiguillas por espiga; ns= no significancia; **=altamente significativo ($p \leq 0.01$); *= significativo ($p \leq 0.05$).

Los análisis de comparación de medias (Cuadros 10 - 12) revelaron que las líneas de mayor rendimiento (CIR, 711, 706, 748, 715 y 738), conforman un grupo superior al combinar valores superiores de rendimiento ($1523 - 1861 \text{ kg ha}^{-1}$) con componentes agronómicos sobresalientes, particularmente una alta densidad de espigas por metro cuadrado (≥ 115 espigas), elevado número de granos por espiga (≥ 44 granos) y mayor peso de mil semillas (≥ 31 g) a excepción de 711 (28.70 g). Asimismo, la línea 748 y 715, destacan con altos valores de PHL ($68.20 - 68.80$ g). Esta combinación sugiere una asignación eficiente de recursos fisiológicos y refuerza la tendencia documentada sobre asociación positiva entre la densidad de espigas, el número de granos por espiga y el rendimiento (Insari *et al.*, 1994).

La ausencia de diferencias estadísticas significativas (Cuadro 10) en el rendimiento entre las líneas podría atribuirse a diversos factores. El número limitado de repeticiones o el tamaño de muestra relativamente pequeño podría haber restringido la potencia estadística del análisis. Asimismo, la similitud genética entre las líneas avanzadas, derivadas de un mismo programa de mejoramiento, podría haber contribuido a una menor variabilidad fenotípica observable, al compartir características agronómicas y adaptativas similares. No obstante, a pesar de la falta de significancia estadística ($p \leq 0.05$), se observaron diferencias numéricas importantes en el rendimiento, con disminuciones superiores a 600 kg ha^{-1} entre líneas bajo condiciones de menor disponibilidad hídrica. Esta reducción, aunque no fue estadísticamente significativa, puede tener implicaciones relevantes desde el punto de vista económico y productivo, por lo que se deben considerarse en la interpretación agronómica (Piepho *et al.*, 2008).

Cuadro 10. Comparación de medias para rendimiento de grano y sus componentes de líneas de trigo cristalino evaluadas bajo dos niveles de riego en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

LIN	REND (kg ha ⁻¹)	LIN	GE (granos· Espiga ⁻¹)	LIN	PGE (g)	LIN	PHL (kg hL ⁻¹)	LIN	PMIL (g)	LIN	EM2 (espigas·m ⁻²)
CIR	1861 ^a	705	62.5 ^a	745	1.97 ^a	716	73.50 ^a	716	40.80 ^a	711	151.00 ^a
711	1734 ^a	711	60.5 ^{ab}	716	1.89 ^a	745	73.00 ^{ab}	738	38.10 ^{ab}	CIR	138.00 ^{ab}
706	1726 ^a	739	59.5 ^{ab}	740	1.84 ^a	713	68.80 ^{ab}	715	37.50 ^{ab}	748	136.00 ^{ab}
748	1725 ^a	740	59 ^{ab}	738	1.79 ^a	715	68.80 ^{ab}	706	35.70 ^{abc}	749	133.00 ^{ab}
715	1654 ^a	728	56.6 ^{ab}	715	1.78 ^a	748	68.20 ^{ab}	745	35.50 ^{abc}	705	128.00 ^{ab}
738	1523 ^a	CIR	56.4 ^{ab}	748	1.76 ^a	728	68.00 ^{ab}	713	33.50 ^{abcd}	715	127.00 ^{ab}
749	1516 ^a	748	56.1 ^{ab}	CIR	1.74 ^a	749	67.30 ^{ab}	740	31.80 ^{bcd}	713	125.00 ^{ab}
705	1514 ^a	745	55.6 ^{ab}	711	1.72 ^a	706	67.20 ^{ab}	CIR	31.10 ^{bcd}	706	125.00 ^{ab}
740	1508 ^a	749	55.4 ^{ab}	739	1.72 ^a	CIR	67.20 ^{ab}	748	31.10 ^{bcd}	740	121.00 ^{ab}
713	1425 ^a	736	50.1 ^{ab}	705	1.70 ^a	711	66.80 ^{ab}	736	30.90 ^{bcd}	738	115.00 ^{ab}
736	1404 ^a	713	48.7 ^{ab}	728	1.65 ^a	740	66.80 ^{ab}	749	30.00 ^{cd}	745	114.00 ^{ab}
716	1396 ^a	715	48.7 ^{ab}	713	1.64 ^a	739	66.40 ^{ab}	728	29.20 ^{cd}	739	113.00 ^{ab}
745	1390 ^a	738	47.4 ^{ab}	749	1.64 ^a	736	66.00 ^{ab}	711	28.70 ^{cd}	716	106.00 ^{ab}
739	1373 ^a	716	45.3 ^{ab}	706	1.57 ^a	738	65.50 ^b	739	28.60 ^{cd}	736	106.00 ^{ab}
728	1186 ^a	706	44.1 ^b	736	1.53 ^a	705	65.00 ^b	705	27.40 ^d	728	100.00 ^b

LIN= línea; REND= rendimiento de grano; GE= granos por espiga; PGE= peso de grano por espiga; PHL= peso hectolítrico; PMIL= peso de mil semillas; EM2= espigas por metro cuadrado. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

La comparación entre niveles de riego (Cuadro 11) evidenció un efecto directo de lámina de riego sobre el rendimiento y atributos físicos del grano. El riego con mayor disponibilidad hídrica (RG 1) generó incrementos significativos ($p \leq 0.05$) en rendimiento (1829 kg ha⁻¹) y peso hectolítrico (70.90 kg hL⁻¹), en comparación con el riego con déficit RG 2 (1 229 kg ha⁻¹ y 64.90 kg hL⁻¹). Estos hallazgos coinciden con los reportes de Guo *et al.* (2019), quienes observaron mejoras sostenidas en el rendimiento de trigo con un suministro hídrico adecuado en regiones semiáridas. Sin embargo, no todos los componentes respondieron de igual forma al déficit hídrico; mientras el peso hectolítrico disminuyó significativamente bajo RG 2, el resto de las variables, incluyendo la densidad de espigas (EM2) no exhibieron variación significativa entre los riegos. Este patrón

sugiere que el número de macollos fértiles podría ser menos sensible al estrés hídrico que otros componentes como el llenado de grano (Bayissa *et al.*, 2023).

Cuadro 11. Comparación de medias para rendimiento de grano y sus componentes en líneas de trigo cristalino bajo dos niveles de riego en el ciclo O-I 2023-2024.

RG	REND (kg ha ⁻¹)	RG	GE (granos*espi ga ⁻¹)	RG	PGE (g)	RG	PHL (kg hL ⁻¹)	RG	PMIL (g)	RG	EM2 (espigas* m ⁻²)
1	1829 ^a	1	55.60 ^a	1	1.86 ^a	1	70.90 ^a	1	34.30 ^a	1	128.90 ^a
2	1229 ^b	2	52.20 ^a	2	1.59 ^a	2	64.90 ^b	2	31.00 ^a	2	117.90 ^a

RG= riegos; REND= rendimiento de grano; GE= granos por espiga; PGE= peso de grano por espiga; PHL= peso hectolítrico; PMIL= peso de mil semillas; EM2= espigas por metro cuadrado. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

En cuanto a las localidades, los resultados mostraron diferencias significativas (Cuadro 12) tanto en el rendimiento de grano como en atributos de calidad, representados por PHL y PMIL, indicadores clave de densidad y tamaño de grano que influyen directamente en el precio y el valor comercial del trigo. En particular, Zaragoza superó de forma consistente a Navidad en los tres parámetros: un rendimiento medio de 1857 kg ha⁻¹ frente a 1201 kg ha⁻¹, un peso hectolítrico de 70.00 kg hL⁻¹ frente a 65.80 kg hL⁻¹ y un peso de mil semillas de 35.20 g frente a 30.20 g. Estas diferencias pueden atribuirse a las condiciones agroambientales de cada sitio: Zaragoza cuenta con un suelo de textura franco-arenosa, mayor capacidad de retención de humedad y pH cercano a la neutralidad, mientras que Navidad posee suelos más arenosos, con mayor drenaje y pH alcalinos.

Gupta *et al.* (2022) estimaron que más del 70% de la variación en rendimiento en ensayos multilocalidad puede explicarse por efectos ambientales principales como textura del suelo y radiación solar durante el ciclo del cultivo. Asimismo, Bayissa *et al.* (2023) subrayaron que el ambiente determina la expresión de caracteres cuantitativos al interactuar con la evapotranspiración y la disponibilidad hídrica.

En este contexto, Zaragoza representa un entorno más favorable para la expresión del potencial genético, convirtiéndola en una localidad estratégica para ensayos de validación de genotipos. Sin embargo, la inclusión de un sitio

contrastante como Navidad sigue siendo fundamental para identificar líneas con estabilidad adaptativa y tolerancia al estrés, aspectos esenciales para enfrentar la variabilidad climática en zonas áridas y semiáridas (García Cruz y Lozano Del Río, 2014).

Cuadro 12. Comparación de medias para rendimiento y sus componentes en líneas de trigo cristalino evaluadas en dos localidades en el ciclo O-I 2023-2024.

LOC	REND (kg ha ⁻¹)	LOC	GE (granos•espiga ⁻¹)	LOC	PGE (g)	LOC	PHL (kg hL ⁻¹)	LOC	PMIL (g)	LOC	EM2 (espigas•m ⁻²)
ZAR	1857 ^a	ZAR	55.5 ^a	ZAR	1.81 ^a	ZAR	70.00 ^a	ZAR	35.20 ^a	ZAR	126.00 ^a
NAV	1201 ^b	NAV	52.0 ^a	NAV	1.65 ^a	NAV	65.80 ^b	NAV	30.20 ^b	NAV	119.00 ^a

LOC= localidades; REND= rendimiento de grano; GE= granos por espiga; PGE= peso de grano por espiga; PHL= peso hectolítrico; PMIL= peso de mil semillas; EM2= espigas por metro cuadrado. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Análisis de caracteres morfo-fisiológicos

Los resultados obtenidos en las pruebas de comparación de medias para los caracteres morfo-fisiológicos se presentan en los Cuadros 13 al 15. Entre las líneas de mayor rendimiento la 715 registró la mayor ALT (76.30 cm), seguida de 738 con 73.70 cm, la cual fue estadísticamente igual al resto de los genotipos, a excepción de la línea 706 que presentó el porte más reducido (64.5 cm) (Cuadro 13). Esta amplitud moderada en altura refleja variabilidad genética en la arquitectura del dosel, donde las líneas de porte intermedio pueden favorecer una mejor captación de luz y disminución del riesgo de acame, optimizando la distribución de fotoasimilados hacia el grano (Lamara *et al.*, 2022).

Aunque no se observaron diferencias significativas para NDVI, las líneas 711, 748 y 749 presentaron altos valores (0.68 unidades), mientras que la 728 y la variedad CIRNO alcanzaron 0.67 y 0.66 unidades NDVI, respectivamente (Cuadro 13). Estos valores reflejan que estas líneas, mostraron una mayor cobertura foliar y verdor durante las etapas de espigamiento y llenado de grano, fases críticas para el potencial de rendimiento. Un NDVI elevado en esas etapas, favorece una mayor captación de radiación y acumulación de biomasa, factores

fuertemente correlacionados con la producción de grano (Thapa *et al.*, 2016; Xue y Su, 2017).

Por otro lado, la línea 739 destacó al presentar los valores más altos tanto en EE (19.40 espiguillas) como en LE (7.84 cm), este comportamiento sugiere que dicha línea posee un mayor potencial para albergar un mayor número de granos, resultados consistentes con lo señalado por Cooper *et al.* (2020) , quienes han reportado que la longitud de espiga y el número de espiguillas están estrechamente asociados con la prolificidad y, en consecuencia, con el rendimiento potencial del cultivo bajo diferentes condiciones ambientales.

Estos resultados, sugieren que los genotipos con combinaciones favorables de altura intermedia y altos valores de LE, EE y NDVI podrían mantener un equilibrio óptimo, la integración de estas variables en la evaluación agronómica permite identificar líneas asociadas a un mejor desempeño bajo condiciones de estrés hídrico, consistente en línea con las estrategias de mejoramiento para ambientes áridos y semiáridos (Snowdon *et al.*, 2021).

Cuadro 13. Comparación de medias para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino evaluadas bajo dos niveles de riego en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

LIN	ALT (cm)	LIN	NDVI (unidades NDVI)	LIN	TEM (°C)	LIN	LE (cm)	LIN	EE (espiguillas• espiga ⁻¹)
715	76.30 ^a	711	0.684 ^a	738	24.40 ^a	739	7.84 ^a	739	19.40 ^a
738	73.70 ^{ab}	748	0.679 ^a	716	24.40 ^a	736	7.39 ^{ab}	705	18.90 ^{ab}
716	73.30 ^{ab}	749	0.679 ^a	711	24.30 ^a	740	7.33 ^{ab}	711	18.50 ^{abc}
728	73.10 ^{ab}	728	0.669 ^a	748	24.20 ^a	711	7.17 ^b	736	18.30 ^{a-d}
736	72.60 ^{ab}	CIR	0.664 ^a	706	24.20 ^a	715	7.14 ^b	716	18.30 ^{a-d}
740	72.50 ^{ab}	705	0.662 ^a	739	24.00 ^a	705	7.12 ^b	715	18.20 ^{a-d}
739	72.20 ^{ab}	715	0.661 ^a	740	23.80 ^a	728	6.79 ^{bc}	740	18.20 ^{a-d}
705	71.50 ^{ab}	740	0.654 ^a	713	23.70 ^a	CIR	6.78 ^{bc}	745	18.10 ^{a-d}
CIR	70.80 ^{ab}	738	0.639 ^a	736	23.70 ^a	749	6.43 ^{cd}	728	18.00 ^{a-d}
748	69.90 ^{ab}	745	0.636 ^a	715	23.70 ^a	738	6.43 ^{cd}	CIR	17.90 ^{a-d}
749	69.60 ^{ab}	706	0.618 ^a	705	23.50 ^a	713	6.36 ^{cd}	748	17.80 ^{a-d}
711	69.00 ^{ab}	736	0.613 ^a	749	23.00 ^a	716	6.16 ^{cd}	749	17.40 ^{bcd}
713	68.90 ^{ab}	713	0.601 ^a	745	22.90 ^a	706	6.11 ^d	713	17.20 ^{bcd}
745	68.00 ^{ab}	739	0.598 ^a	CIR	22.50 ^a	745	6.02 ^d	706	17.10 ^{cd}
706	64.50 ^b	716	0.586 ^a	728	22.50 ^a	748	6.02 ^d	738	16.60 ^d

LIN= líneas; ALT= altura de planta; NDVI= índice de vegetación de diferencia normalizada; TEM= temperatura; LE= longitud de espiga; EE= espiguillas por espiga. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

En cuanto a la comparación de las medias de los riegos evaluados (Cuadro 14), la altura de planta no mostró diferencias significativas (RG 1; 72.80 cm, RG2; 69.30 cm), un comportamiento similar al documentado por Nehe *et al.* (2021), quienes observaron que algunas líneas de trigo pueden mantener el crecimiento del tallo con variaciones menores al 5% al optimizar la absorción de agua y distribuirla de forma eficiente hacia los tejidos de crecimiento. Por otro lado, el NDVI promedio se redujo de 0.66 en RG1 a 0.62 en RG2 (7%), sin embargo, no se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Este hallazgo coincide con Mohi-Ud-Din *et al.* (2022), quienes reportaron descensos de NDVI de magnitud similar bajo estrés hídrico, aun cuando las mermas de rendimiento no llegaron a ser severas, sugiriendo una ligera pérdida de biomasa foliar y vigor. De igual forma, no se detectaron diferencias significativas en LE y EE.

Cuadro 14. Comparación de medias entre dos niveles de riego para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino evaluadas en dos localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

RG	ALT (cm)	RG	NDVI (unidades NDVI)	RG	TEM (°C)	RG	LE (cm)	RG	EE (espiguillas•espiga ⁻¹)
1	72.80 ^a	1	0.664 ^a	2	24.40 ^a	2	6.76 ^a	1	18.50 ^a
2	69.30 ^a	2	0.621 ^a	1	23.00 ^a	1	6.72 ^a	2	17.40 ^a

RG= riegos; ALT= altura de planta; NDVI= índice de vegetación de diferencia normalizada; TEM= temperatura; LE= longitud de espiga; EE= espiguillas por espiga. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

En relación con la comparación de medias de las dos localidades (Cuadro 15), las líneas desarrolladas en Zaragoza mostraron una altura significativamente mayor que en Navidad (80.50 cm y 61.60 cm, respectivamente), lo que refleja la elevada plasticidad de este carácter ante variaciones ambientales. En este sentido, Aparicio *et al.* (2000) documentaron que la altura de trigo puede caer de 98.60 cm a 58.30 cm simplemente al pasar de riego completo a estrés hídrico severo, evidenciando la dependencia del crecimiento vegetativo de las condiciones locales. A pesar de esta diferencia en altura, el vigor de dosel, medido por NDVI, no varió entre sitios (0.68 y 0.60), lo que coincide con resultados de Lobos *et al.* (2014), quienes reportaron que los índices espectrales de vegetación mantienen su fiabilidad para comparar genotipos bajo distintos regímenes de agua en distintos ambientes. No obstante, la temperatura en Zaragoza fue más alta que en Navidad (26.80°C y 20.50°C, respectivamente), Prieto *et al.* (2020) han vinculado a una reducción en el número final de espiguillas, en ambientes donde las temperaturas son moderadas, la fase de elongación se prolonga, dando lugar a espigas más largas favoreciendo mayor número de espiguillas, temperaturas elevadas durante la prefloración disminuyen la viabilidad de los floretes y limitan la formación de espiguillas (Prasad y Djanaguiraman, 2014).

Cuadro 15. Comparación de medias entre dos localidades para caracteres morfo-fisiológicos y componentes de rendimiento de líneas de trigo cristalino evaluadas durante el ciclo O-I 2023-2024.

LOC	ALT (cm)	LOC	NDVI (unidades NDVI)	LOC	TEM (°C)	LOC	LE (cm)	LOC	EE (espiguillas•espiga ⁻¹)
ZAR	80.50 ^a	ZAR	0.684 ^a	ZAR	26.80 ^a	NAV	6.84 ^a	NAV	18.90 ^a
NAV	61.60 ^b	NAV	0.601 ^a	NAV	20.50 ^a	ZAR	6.64 ^a	ZAR	17.10 ^b

LOC= localidades; ZAR= Zaragoza, Coahuila; NAV= Navidad, Nuevo León; ALT= altura de planta; NDVI= índice de vegetación de diferencia normalizada; TEM= temperatura; LE= longitud de espiga; EE= espiguillas por espiga. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Identificación de líneas con tolerancia al estrés hídrico

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre localidades para el rendimiento de grano (REND) ($p \leq 0.05$), por lo que las estimaciones de los índices de sequía se realizaron por localidad, posteriormente se identificaron las líneas tolerantes al estrés hídrico tanto para Navidad, Nuevo León (Cuadro 16) como para Zaragoza, Coahuila (Cuadro 17). Esta estrategia es consistente con lo propuesto por Cooper *et al.* (2020), quienes sugieren que al considerar ambientes específicos se puede identificar tanto adaptación local como estabilidad en múltiples ambientes, lo cual es fundamental en contextos de variabilidad climática creciente.

El Índice de Tolerancia (TOL) permitió identificar a las líneas 738 (TOL = -996.73) y 715 (TOL = -80.89) como aquellas con la menor reducción absoluta en rendimiento bajo condiciones de estrés en Navidad (Cuadro 16). En Zaragoza, las líneas 715 (TOL = 399.61) y 711 (TOL = 433.42) destacaron por presentar los valores más bajos de este indicador (Cuadro 17). Fischer y Maurer, (1978), mencionan que valores bajos o negativos como los observados sugieren una mayor eficiencia fisiológica en el uso del agua, posiblemente derivada de una regulación estomática eficiente y un buen mantenimiento del llenado de grano.

El Índice de Productividad Media (MP) señaló a la variedad CIR (MP = 1651.35) y a la línea 706 (MP = 1505.46) como las más destacadas en Navidad, mientras que en Zaragoza sobresalieron las líneas 738 (MP = 2171.96) y 711 (MP = 2150.47), por su mayor rendimiento promedio bajo condiciones tanto de alta

disponibilidad hídrica como de estrés. De acuerdo con Rosielle y Hamblin (1981), además de identificar genotipos con buen rendimiento general, estos valores están relacionados con características como una arquitectura foliar favorable, mayor área fotosintética activa y una partición eficiente de biomasa hacia estructuras reproductivas.

En el caso del Índice de Estabilidad de Rendimiento (YSI), mostraron a las líneas 738 (YSI = 3.65) y 715 (YSI = 1.07) en Navidad, y 715 (YSI = 0.83) y 711 (YSI = 0.82) en Zaragoza, con mayor estabilidad. Este tipo de respuesta puede asociarse con mecanismos como una reducción en la pérdida de agua por transpiración, cutículas más gruesas o un sistema radical más profundo, todos ellos considerados componentes fisiológicos clave en la tolerancia a sequía (Blum, 2011).

El Índice de Susceptibilidad a la Sequía (SSI) identificó a las líneas 738 (SSI= -8.04) y 715 (SSI= -0.22) como las menos afectadas en Navidad, mientras que en Zaragoza destacaron las líneas 715 (SSI= 0.52) y 711 (SSI= 0.56). Estos resultados confirman su resiliencia frente a la reducción de la disponibilidad de agua (Fischer & Maurer, 1978) y podrían estar relacionados con mecanismos de tolerancia como un mayor contenido relativo de agua, la acumulación de osmoprotectores y ajuste osmótico eficiente (Prasanna, 2003).

El Índice de Tolerancia al Estrés Hídrico (STI), mostraron a las líneas CIR (STI = 1.22), 706 (STI = 1.07), 748 (STI = 0.96), 749 (STI = 0.79) y 711 (STI = 0.72) con los valores más altos en Navidad, mientras que en Zaragoza destacaron las líneas 711 (STI= 0.93), 738 (STI = 0.92), 715 (STI = 0.91), CIR (STI = 0.85), 740 (STI = 0.82) y 706 (STI = 0.75). Los valores elevados de STI sugieren que estos materiales presentan una notable plasticidad fenotípica, lo que les permite ajustar su crecimiento y desarrollo ante condiciones variables de humedad (Fernández, 1992).

Por su parte, el Índice de Resistencia a la Sequía (DI), reveló como tolerantes a las líneas 705 (DI = 0.67), 745 (DI = 0.58) y 711 (DI = 0.55) en Navidad, y a las líneas 739 (DI = 0.58) y 716 (DI = 0.51) en Zaragoza. Según Blum (2011), tales respuestas pueden estar relacionadas con una mayor biomasa radicular,

eficiencia en la extracción de agua del suelo y una sincronización fenológica favorable con la disponibilidad hídrica.

Con base a lo anterior, la integración de los distintos índices de sequía permitió identificar líneas de trigo cristalino con tolerancia al estrés hídrico. Entre ellas, las líneas 706, 711, 715, 738, 748, 749 y la variedad CIRNO se posicionaron de manera consistente entre los genotipos más destacados en los múltiples índices y localidades, lo que respalda su potencial como materiales tolerantes y de alto rendimiento.

Cuadro 16. Valores de rendimiento e índices de sequía por línea de trigo cristalino bajo dos niveles de riego en Navidad, Nuevo León, ciclo O-I 2023-2024.

LIN	RG1(Yp)	RG2 (Ys)	LIN	TOL	LIN	MP	LIN	YSI	LIN	SSI	LIN	STI	LIN	DI
CIR	2095.46	1207.23	705	1353.11	CIR	1651.35	738	3.65	705	2.03	CIR	1.22	705	0.67
705	2022.80	669.69	711	995.63	706	1505.46	715	1.07	745	1.75	706	1.07	745	0.58
706	1714.33	1296.60	748	947.95	748	1487.85	736	0.90	711	1.66	748	0.96	711	0.55
711	1814.66	819.04	745	905.76	705	1346.24	716	0.85	748	1.46	749	0.79	748	0.48
713	1373.40	718.86	CIR	888.23	749	1340.57	740	0.80	713	1.44	711	0.72	713	0.48
715	1139.20	1220.09	749	802.83	711	1316.85	706	0.76	749	1.40	715	0.67	749	0.46
716	1267.55	1078.15	713	654.54	715	1179.64	728	0.71	CIR	1.28	716	0.66	CIR	0.42
728	1135.44	800.63	706	417.74	716	1172.85	739	0.67	739	0.99	705	0.65	739	0.33
736	1068.93	966.41	739	397.37	745	1117.60	CIR	0.58	728	0.89	745	0.50	728	0.29
738	375.58	1372.31	728	334.81	713	1046.13	749	0.54	706	0.74	736	0.50	706	0.24
739	1210.21	812.85	740	214.36	736	1017.67	713	0.52	740	0.60	713	0.48	740	0.20
740	1089.16	874.80	716	189.40	739	1011.53	748	0.52	716	0.45	739	0.48	716	0.15
745	1570.48	664.72	736	102.52	740	981.98	711	0.45	736	0.29	740	0.46	736	0.10
748	1961.83	1013.88	715	-80.89	728	968.04	745	0.42	715	-0.22	728	0.44	715	-0.07
749	1741.99	939.16	738	-996.73	738	873.94	705	0.33	738	-8.04	738	0.25	738	-2.65
MEDIA	1438.73	963.63												

LIN= línea; RG1(Yp)= rendimiento de grano en condiciones óptimas; RG2(Ys)= rendimiento de grano en condiciones de sequía; TOL= índice de tolerancia; MP= índice de productividad media; YSI= índice de estabilidad del rendimiento; SSI= índice de susceptibilidad a la sequía; STI= índice de tolerancia al estrés; DI= índice de resistencia a la sequía.

Cuadro 17. Valores de rendimiento e índices de sequía por línea de trigo cristalino bajo dos niveles de riego en Zaragoza, Coahuila, ciclo O-I 2023-2024.

LIN	RG1(Yp)	RG2 (Ys)	LIN	TOL	LIN	MP	LIN	YSI	LIN	SSI	LIN	STI	LIN	DI
CIR	2411.73	1731.09	739	1412.58	738	2171.96	715	0.83	739	1.77	711	0.93	739	0.58
705	2030.00	1334.53	716	1116.06	711	2150.47	711	0.82	716	1.57	738	0.92	716	0.51
706	2289.30	1605.36	748	973.04	715	2127.70	736	0.74	749	1.30	715	0.91	749	0.43
711	2367.18	1933.76	749	913.30	CIR	2071.41	740	0.74	748	1.21	CIR	0.85	748	0.40
713	2091.72	1515.76	738	811.05	740	2034.93	713	0.72	705	1.05	740	0.82	705	0.34
715	2327.50	1927.90	705	695.47	748	1962.14	CIR	0.72	738	0.96	706	0.75	738	0.31
716	2177.50	1061.44	706	683.94	706	1947.33	745	0.72	728	0.95	748	0.73	728	0.31
728	1661.55	1145.42	CIR	680.64	713	1803.74	706	0.70	706	0.91	713	0.64	706	0.30
736	2053.61	1527.93	740	611.83	736	1790.77	728	0.69	745	0.87	736	0.64	745	0.28
738	2577.48	1766.43	713	575.96	739	1733.60	738	0.69	CIR	0.86	705	0.55	CIR	0.28
739	2439.89	1027.31	745	550.80	749	1691.70	705	0.66	713	0.84	745	0.54	713	0.28
740	2340.85	1729.02	736	525.68	705	1682.27	748	0.60	740	0.80	749	0.54	740	0.26
745	1937.28	1386.48	728	516.14	745	1661.88	749	0.57	736	0.78	739	0.51	736	0.26
748	2448.66	1475.62	711	433.42	716	1619.47	716	0.49	711	0.56	716	0.47	711	0.18
749	2148.35	1235.05	715	399.61	728	1403.48	739	0.42	715	0.52	728	0.39	715	0.17
MEDIA	2220.17	1493.54												

LIN= línea; RG1(Yp)= rendimiento de grano en condiciones óptimas; RG2(Ys)= rendimiento de grano en condiciones de sequía; TOL= índice de tolerancia; MP= índice de productividad media; YSI= índice de estabilidad del rendimiento; SSI= índice de susceptibilidad a la sequía; STI= índice de tolerancia al estrés; DI= índice de resistencia a la sequía.

Validación de índices de sequía para la selección de genotipos en Navidad, N.L.

En Navidad, N.L. (Cuadro 18), los índices de sequía mostraron comportamientos muy diferenciados en cuanto a su capacidad para predecir el rendimiento de grano bajo déficit hídrico debido a la alta variabilidad espacial y temporal. El análisis de regresión simple exhibió que los índices YSI, TOL, SSI y DI mostraron efectos significativos ($p \leq 0.05$); en tanto que, los índices STI y MP no fueron significativos. Los coeficientes de determinación (R^2) de TOL (0.38), YSI (0.38), SSI (0.37) y DI (0.38) tuvieron la misma proporción en cuanto a la contribución de relación con el rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico.

Cuadro 18. Análisis de varianza y parámetros de regresión lineal simple de índices de sequía asociados al rendimiento de grano bajo déficit hídrico en Navidad, N.L.

FV	GL	STI	YSI	TOL	MP	SSI	DI	
REND (Ys)	1	84966	275419	279802	38272	274139	275419	
RESIDUAL	13	49849	35199	34862	53441	35298	35199	
<i>p-value</i>		0.214	0.015	* 0.014	* 0.412	0.015	* 0.015	*
β_0		768.7	814.33	1081.394	690.952	989.47	989.70	
β_1		296.8	175.37	-0.247	0.2270	-57.68	-175.37	
R^2		0.116	0.376	0.381	0.052	0.374	0.3757	

FV= fuentes de variación; GL= grados de libertad; STI= índice de tolerancia al estrés; YSI= índice de estabilidad del rendimiento; TOL= índice de tolerancia; MP= índice de productividad media; SSI= índice de susceptibilidad a la sequía; DI= índice de resistencia a la sequía; REND(Ys)= rendimiento de grano bajo condiciones de sequía; β_0 = intercepto; β_1 = pendiente de la regresión; R^2 = coeficiente de determinación; *= significativo ($p \leq 0.05$).

El STI favorece la selección de genotipos con alto potencial de rendimiento y buena respuesta al estrés hídrico. Sin embargo, su dependencia del cuadrado del rendimiento medio lo hace sensible al ruido ambiental en sitios heterogéneos como Navidad; el modelo de regresión que relaciona STI y rendimiento presentó un bajo grado de ajuste, explicando únicamente el 12% de la variación del rendimiento ($R^2 = 0.12$) (Cuadro 18). Este comportamiento coincide con estudios previos que reportan que el STI pierde poder predictivo en ambientes altamente heterogéneos, donde entornos con fuerte interacción genotipo-ambiente, interacción suelo-clima y heterogeneidad edáfica generan un considerable ruido experimental (Bhandari *et al.*, 2024). Además, Golabadi *et al.* (2006) han descrito que el STI presentó bajo nivel de predicción de los genotipos más productivos bajo estrés severo.

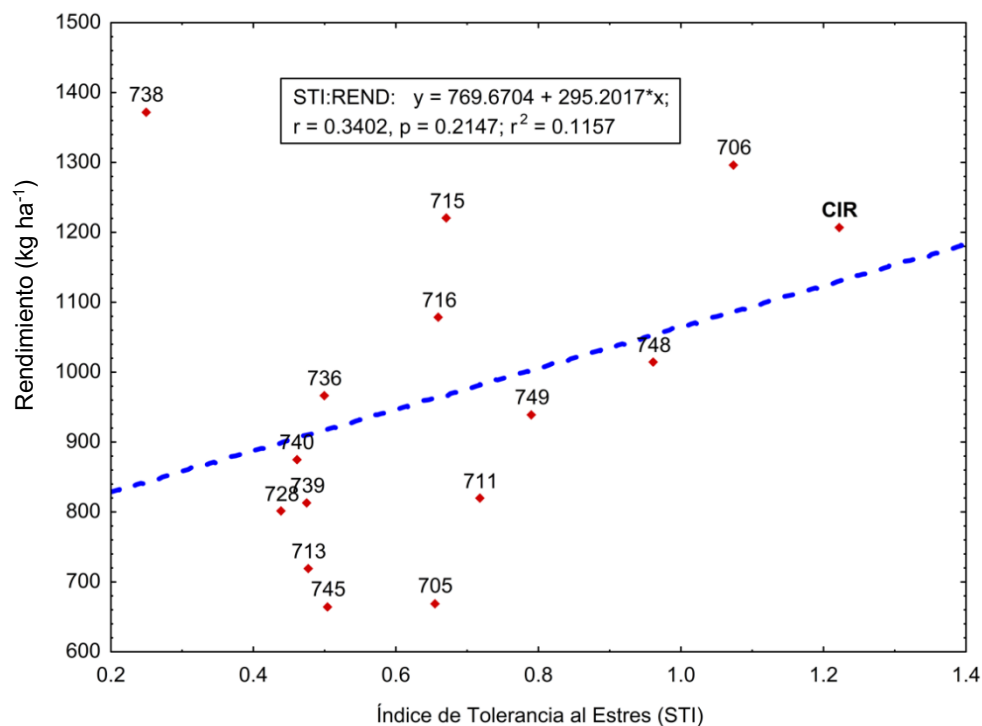


Figura 1. Relación entre el índice de sequía STI y el rendimiento de grano en Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.

El YSI, permitió una clara diferenciación entre las líneas evaluadas respecto a su estabilidad bajo condiciones de estrés hídrico (Figura 2). El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.37$) para este índice evidencia una asociación moderada entre el YSI y el rendimiento bajo condiciones de estrés hídrico, lo que implica que, aunque el índice es útil para identificar líneas estables, su poder explicativo no es completamente determinante y debe ser complementado con otros indicadores fisiológicos y productivos (Piepho *et al.*, 2008). El YSI tiende a favorecer genotipos con altos rendimientos bajo estrés, aun cuando su rendimiento en condiciones óptimas no sea elevado (Bousslama y Schapaugh, 1984).

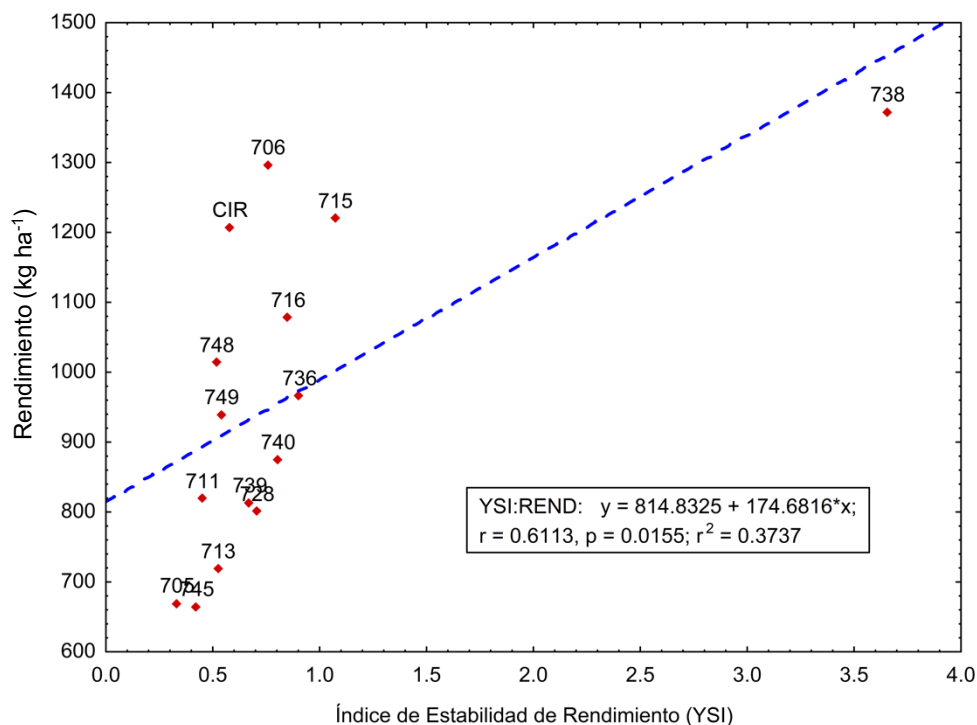


Figura 2. Relación entre el índice de sequía YSI y el rendimiento de grano en Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.

En cuanto al TOL, el análisis de regresión lineal entre los valores del índice TOL y el rendimiento bajo estrés registró un coeficiente de determinación (R^2) de 0.38, lo que indica una asociación moderada y significativa entre ambos parámetros (Figura 3). Esta asociación sugiere que TOL no sólo refleja adecuadamente la sensibilidad de las líneas a la reducción del agua, sino que también permite discriminar entre genotipos estables y susceptibles (Blum, 2011). Se observó una clara diferenciación entre los genotipos evaluados en la localidad de Navidad, N.L.

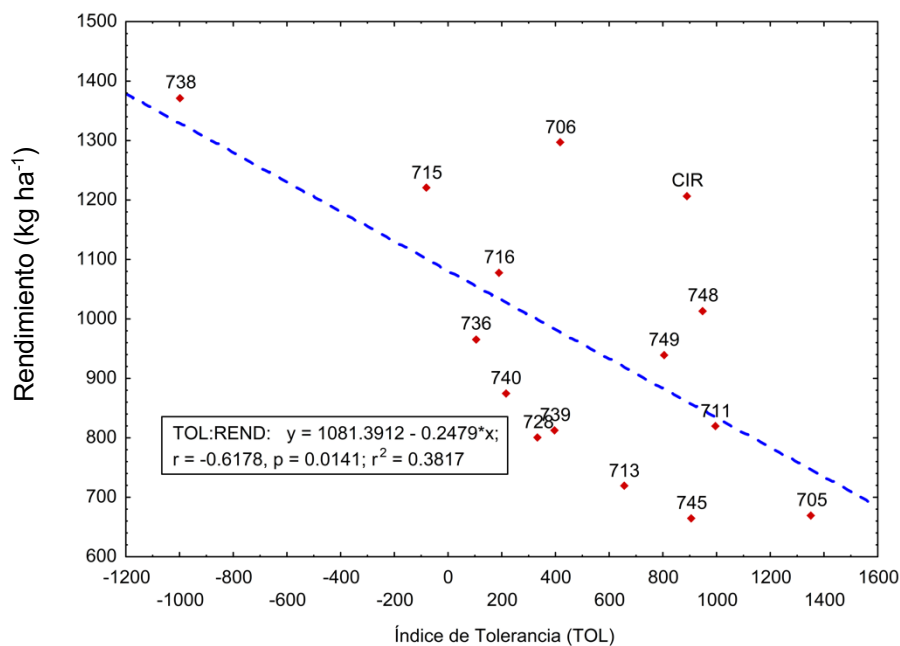


Figura 3. Relación entre el índice de sequía TOL y el rendimiento de grano en Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.

En cuanto al MP (Figura 4), el coeficiente de determinación de la regresión fue bajo ($R^2 = 0.05$), lo que indica una relación débil entre este índice y el rendimiento en condiciones estresantes. Este resultado coincide con lo reportado por Rosielle y Hamblin (1981), quienes señalaron que el índice MP puede sobreestimar la adaptación en genotipos moderadamente tolerantes, pero con altos rendimientos en condiciones óptimas de riego. Por ello, su interpretación debe ser complementada con otros índices que capturen mejor la eficiencia bajo estrés severo.

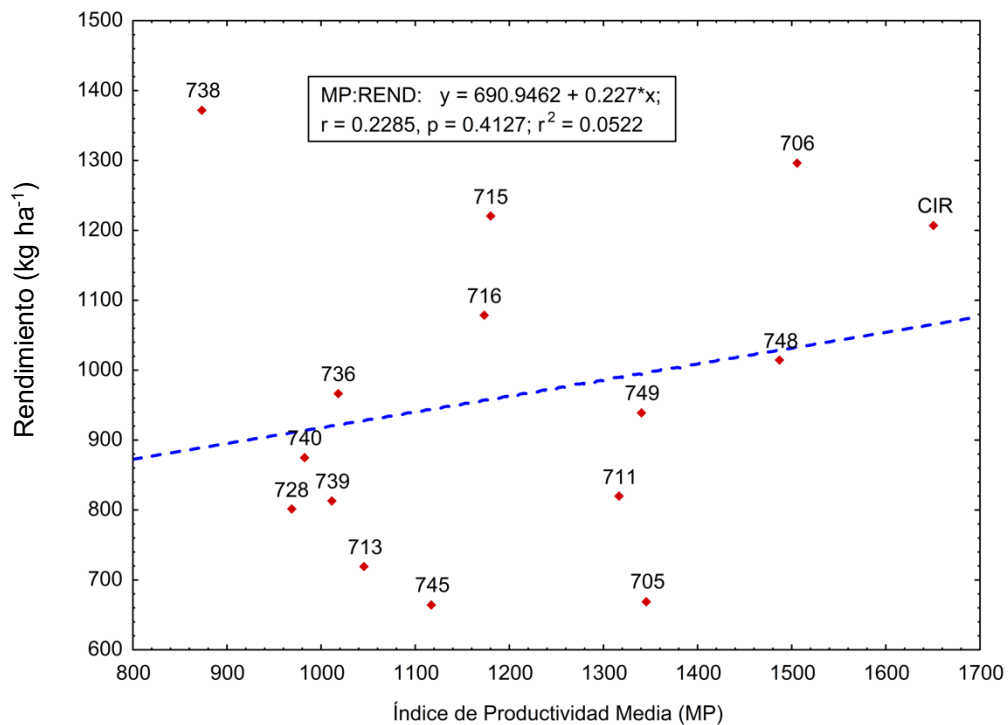


Figura 4. Relación entre el índice de sequía MP y el rendimiento de grano en la localidad de Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.

El SSI presentó una asociación moderada con el rendimiento bajo estrés hídrico, con un valor de $R^2 = 0.37$ (Figura 5), este comportamiento asocia que el SSI fue relativamente eficaz para discriminar líneas con diferente respuesta al estrés hídrico en este ambiente.

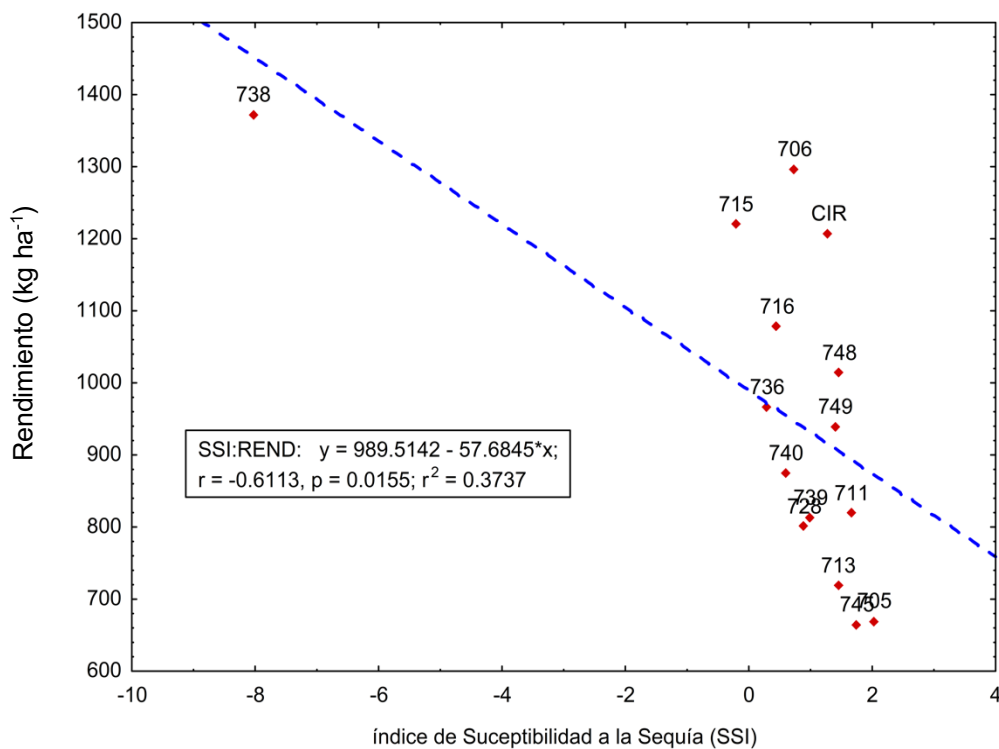


Figura 5. Relación entre el índice de sequía SSI y el rendimiento de grano en Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.

En cuanto al DI, el coeficiente de determinación (R^2) obtenido fue de 0.37 (Figura 6), lo que indica que este índice explica una proporción relevante de la variabilidad del rendimiento en las líneas evaluadas bajo condiciones de déficit hídrico. Por ello, se considera una herramienta útil para identificar genotipos con buena adaptación a ambientes con disponibilidad limitada de agua.

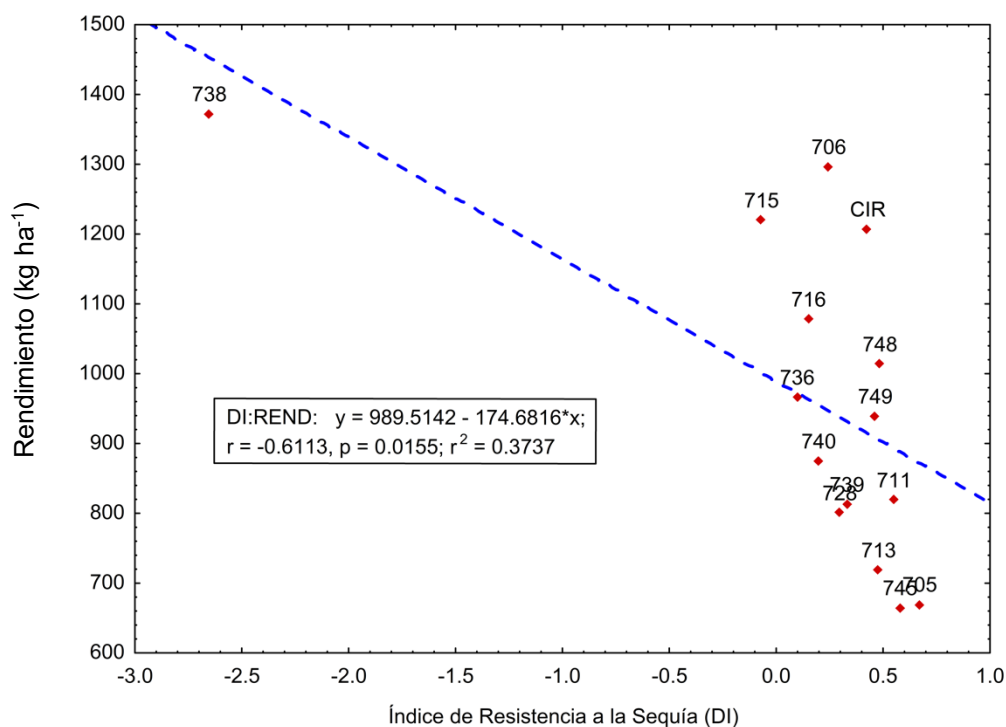


Figura 6. Relación entre el índice de sequía DI y el rendimiento de grano en Navidad N.L., ciclo O-I 2023-2024.

La validación de los índices de sequía en la localidad de Navidad, N.L., reveló diferencias importantes en su capacidad para predecir el rendimiento bajo condiciones de déficit hídrico (Cuadro 18), evidenciando que ningún índice por sí solo resulta completamente determinante en ambientes altamente heterogéneos. Entre los índices evaluados, el YSI, TOL, SSI y DI, mostraron una mejor asociación con el rendimiento bajo estrés, permitiendo identificar con mayor claridad a los genotipos más estables y tolerantes, como las líneas 738 y 715, que destacaron consistentemente en múltiples índices. Por su parte, el STI y MP presentaron limitaciones en su poder predictivo debido a su sensibilidad al ambiente o a su tendencia a favorecer genotipos con buen desempeño en condiciones óptimas. En conjunto, estos resultados destacan la necesidad de utilizar una combinación de índices complementarios para una selección más precisa de genotipos tolerantes a la sequía, siendo particularmente útil integrar

índices fisiológicos y productivos en contextos con alta variabilidad ambiental como el de Navidad, N.L.

Validación de índices de sequía para la selección de genotipos en Zaragoza, Coahuila

En Zaragoza, Coahuila, los índices de sequía presentaron una mayor coherencia en su capacidad para predecir el rendimiento de grano bajo condiciones de estrés hídrico (Cuadro 19). En esta localidad, se observaron asociaciones más consistentes entre los valores de los índices y la productividad de los genotipos, lo que sugiere que las condiciones edafoclimáticas locales favorecieron una expresión más estable y diferenciada del material genético. Es posible que una menor variabilidad ambiental, una mejor uniformidad del suelo o un clima más moderado durante el ciclo de cultivo hayan reducido el "ruido" experimental, permitiendo así una evaluación más precisa del comportamiento genotípico (Bänziger *et al.*, 2000; Blum, 2011). Estos resultados respaldan el valor predictivo de los índices de sequía cuando se aplican en entornos con menor interacción genotipo-ambiente, y refuerzan su utilidad como herramientas para la selección de materiales tolerantes en programas de mejoramiento genético (Fischer y Maurer, 1978; Fernandez, 1993).

Cuadro 19. Análisis de varianza y parámetros de regresión lineal simple de índices de sequía asociados al rendimiento de grano bajo déficit hídrico en Zaragoza, Coah.

FV	GL	STI	YSI	TOL	MP	SSI	DI	
REND(Ys) t ha ⁻¹	1	1088710	847021	516378	958246	845487	847021	
RESIDUAL	13	9495	28086	53521	19531	28204	28086	
<i>p-value</i>		8.09e-08	** 0.000103	** 0.0083	** 9.278e-06	** 0.000106	** 0.000103	**
β_0		431.3	18.12	1997.344	-625.308	2209.0	2210.2	
β_1		1563.6	2189.05	-0.693	1.141	-717.8	-2196.3	
R ²		0.898	0.700	0.426	0.790	0.697	0.698	

FV= fuentes de variación; GL= grados de libertad; STI= índice de tolerancia a la sequía; YSI= índice de estabilidad del rendimiento; TOL= índice de tolerancia; MP= índice de productividad media; SSI= índice de susceptibilidad a la sequía; DI= índice de resistencia a sequía; REND(Ys) t ha⁻¹= rendimiento de grano bajo condiciones de sequía; β_0 = intercepto; β_1 = pendiente de la regresión; R²= coeficiente de determinación **= significativo ($p \leq 0.01$).

El STI, presentó la asociación más alta con el rendimiento de grano en Zaragoza, Coahuila ($R^2 = 0.89$), evidenciando un ajuste superior en la regresión lineal simple (Figura 7). Esta mayor asociación, en comparación, se atribuye a que las condiciones ambientales más homogéneas de Zaragoza favorecieron una expresión genética más estable, reduciendo la interferencia del ambiente en la relación entre índice y rendimiento (Bänziger *et al.*, 2000; Blum, 2011). Estos resultados confirman que el STI permite discriminar de manera efectiva entre genotipos resilientes y susceptibles, siendo especialmente confiable en ambientes donde la variabilidad ambiental es limitada y la expresión del germoplasma es más consistente.

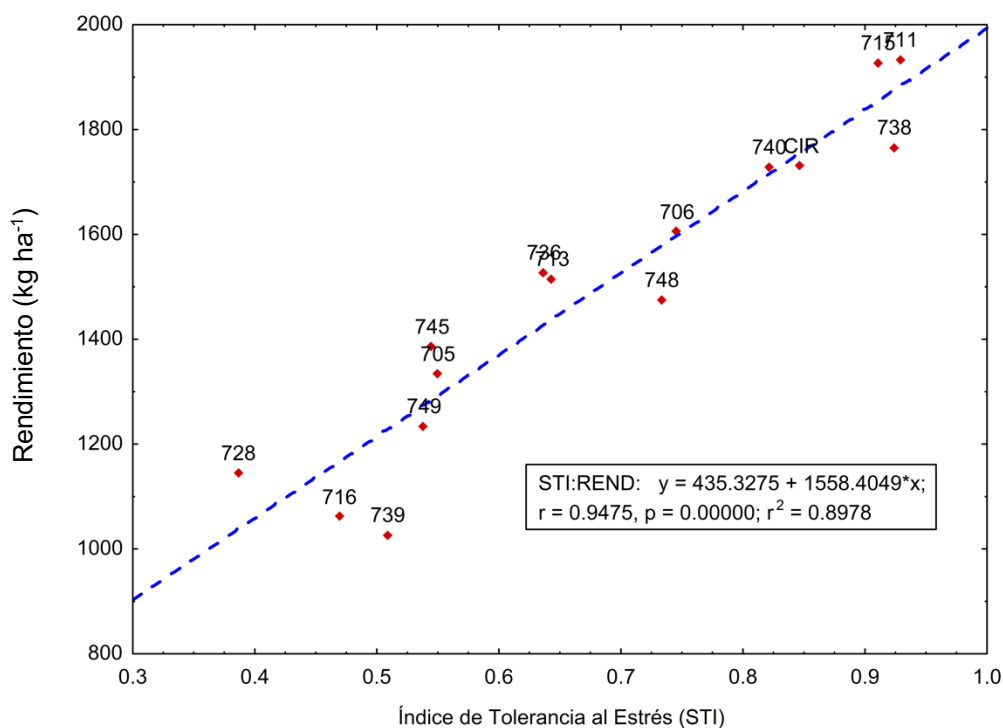


Figura 7. Relación entre el efecto del índice de sequía STI y el rendimiento de grano en Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.

El índice YSI mostró una asociación altamente positiva con el rendimiento de grano ($R^2 = 0.70$), resultado de la marcada diferenciación en la respuesta de los genotipos frente al déficit hídrico (Figura 8). La alta R^2 se explica porque las

condiciones ambientales más homogéneas en esta localidad permitieron que las diferencias en reducción proporcional del rendimiento se reflejaran directamente en los valores del índice, generando un patrón claro entre estabilidad y productividad (Bänziger *et al.*, 2000; Blum, 2011).

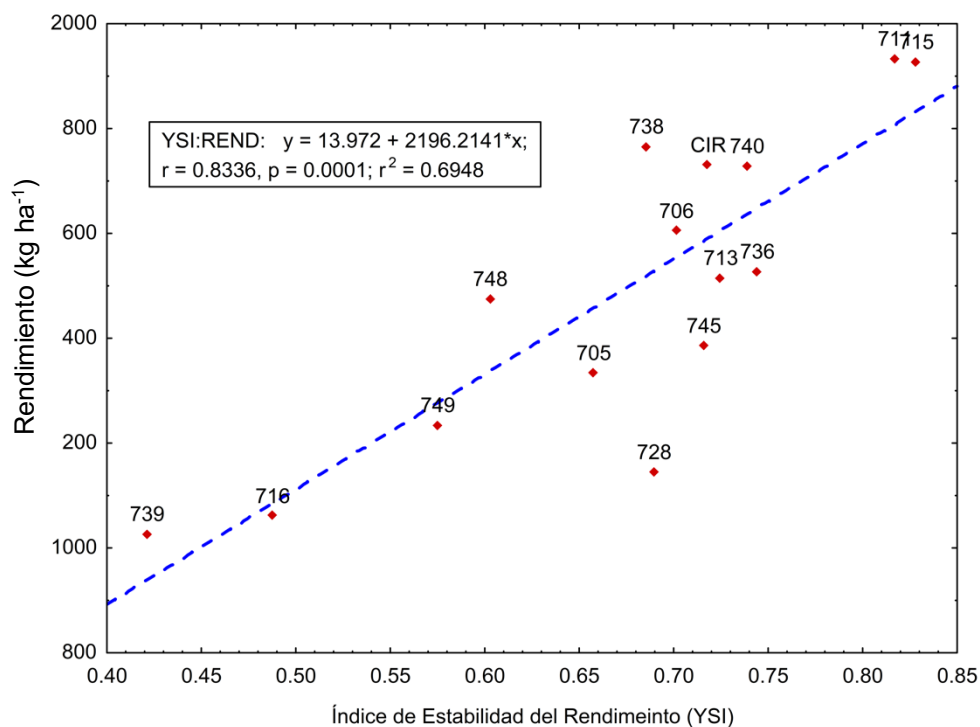


Figura 8. Relación entre el índice de sequía YSI y el rendimiento de grano en Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.

El índice TOL mostró una asociación moderada ($R^2 = 0.43$), reflejando que solo una parte de la variación en la pérdida de rendimiento bajo estrés se explicó por este índice (Figura 9). La asociación observada se explica porque las condiciones homogéneas de Zaragoza facilitaron que las diferencias en la magnitud de la pérdida de rendimiento se manifestaran de manera clara entre genotipos, aunque la sensibilidad del índice sigue siendo limitada en materiales de alto desempeño (Bänziger *et al.*, 2000). En conjunto, estos resultados confirman que el TOL puede identificar genotipos con reducciones mínimas ante déficit hídrico, pero su poder predictivo es menor frente a índices que integran simultáneamente estabilidad y potencial de rendimiento.

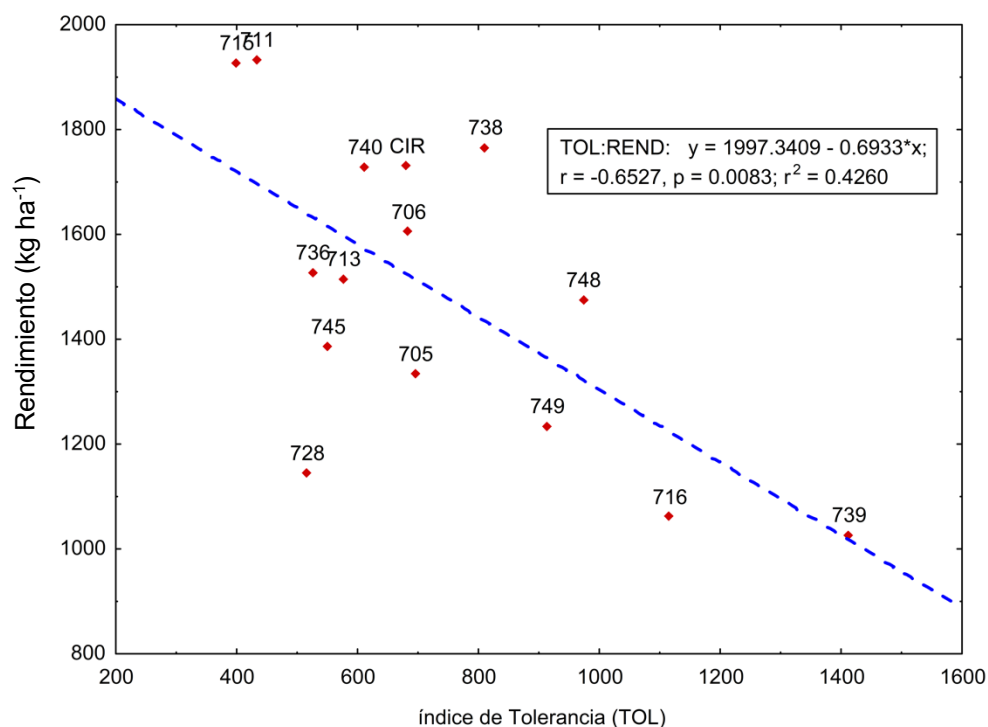


Figura 9. Relación entre el índice de sequía TOL y el rendimiento de grano en Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.

El MP presentó una alta asociación con el rendimiento de grano ($R^2 = 0.79$), lo que indica que los genotipos con desempeño equilibrado entre condiciones óptimas y de estrés fueron los que mejor explicaron la variación productiva (Figura 10). La clara diferenciación entre genotipos contrastantes explica la elevada R^2 observada, ya que las líneas de mayor MP mostraron simultáneamente alto potencial productivo y tolerancia relativa, propiedades que incrementan la capacidad predictiva del índice (Fernandez, 1993; Mohammadi *et al.*, 2017).

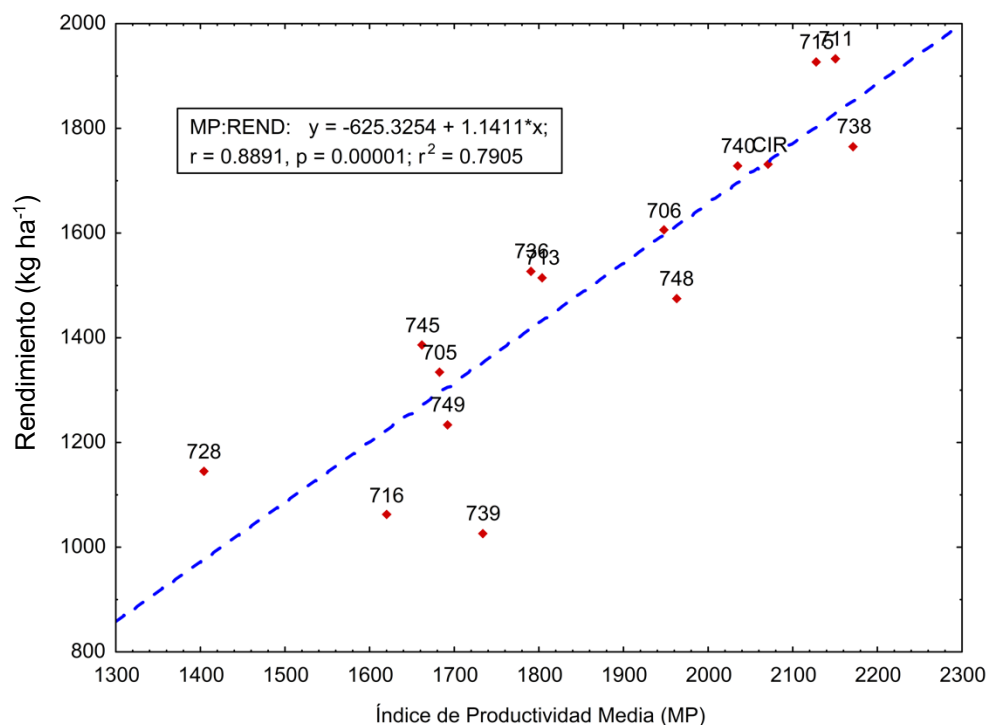


Figura 10. Relación entre el índice de sequía MP y el rendimiento de grano en Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.

El SSI mostró una asociación alta ($R^2 = 0.69$), lo que indica que las diferencias en sensibilidad al estrés hídrico entre genotipos se reflejaron de manera clara en su productividad (Figura 11). Las líneas 711 y 715 registraron los valores más bajos de SSI y, al mismo tiempo, los mayores rendimientos, lo que evidencia que su reducción relativa de rendimiento bajo sequía fue mínima, este comportamiento sugiere que estos genotipos presentan una combinación favorable de tolerancia al estrés y eficiencia fisiológica, asociada a mecanismos de estabilidad estomática y aprovechamiento eficiente del agua (Blum, 2011). Por el contrario, los genotipos con valores más altos de SSI experimentaron mayores caídas de rendimiento, lo que refleja su mayor susceptibilidad a condiciones de déficit hídrico. La diferenciación entre líneas tolerantes y susceptibles generó un patrón definido en la regresión, explicando la R^2 obtenida y confirmando que el SSI es útil para identificar materiales que mantienen su rendimiento relativo ante sequía (Fischer y Maurer, 1978; Mohammadi y Prasanna, 2003).

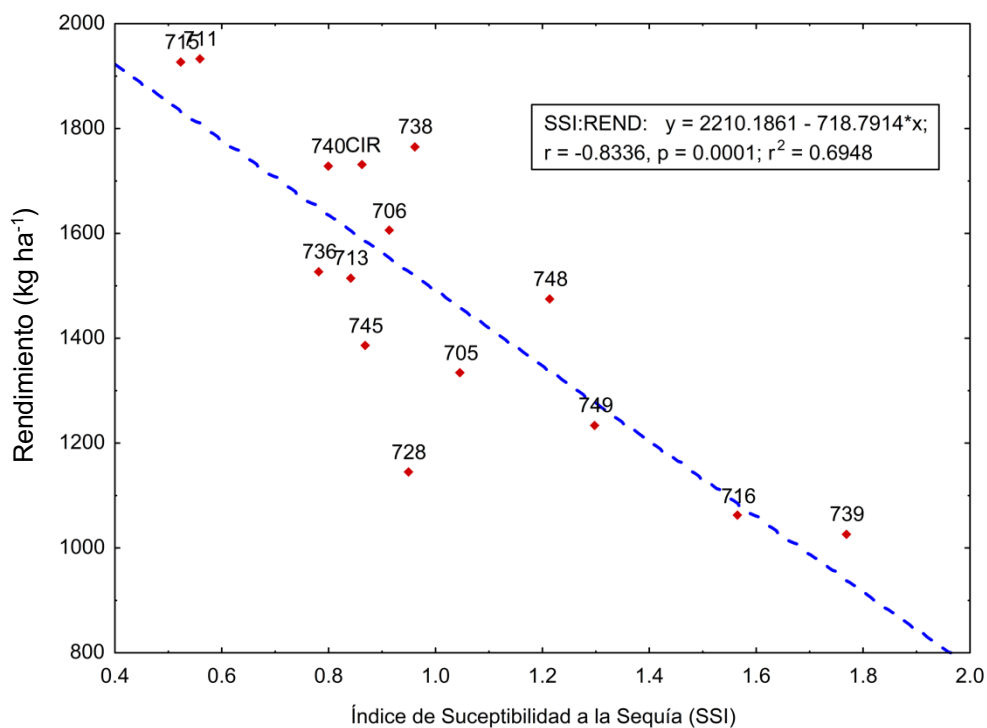


Figura 11. Relación entre el índice de sequía SSI y el rendimiento de grano en Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.

El DI mostró una asociación alta ($R^2 = 0.69$), evidenciando que las diferencias en la respuesta de los genotipos frente al estrés hídrico se reflejaron de manera consistente en la productividad observada (Figura 12). La clara diferenciación entre genotipos tolerantes y susceptibles generó un patrón definido en la regresión, explicando la R^2 observada y confirmando que el DI es un índice útil para discriminar materiales con buena estabilidad frente a la sequía (Mohammadi y Abdulahi, 2017).

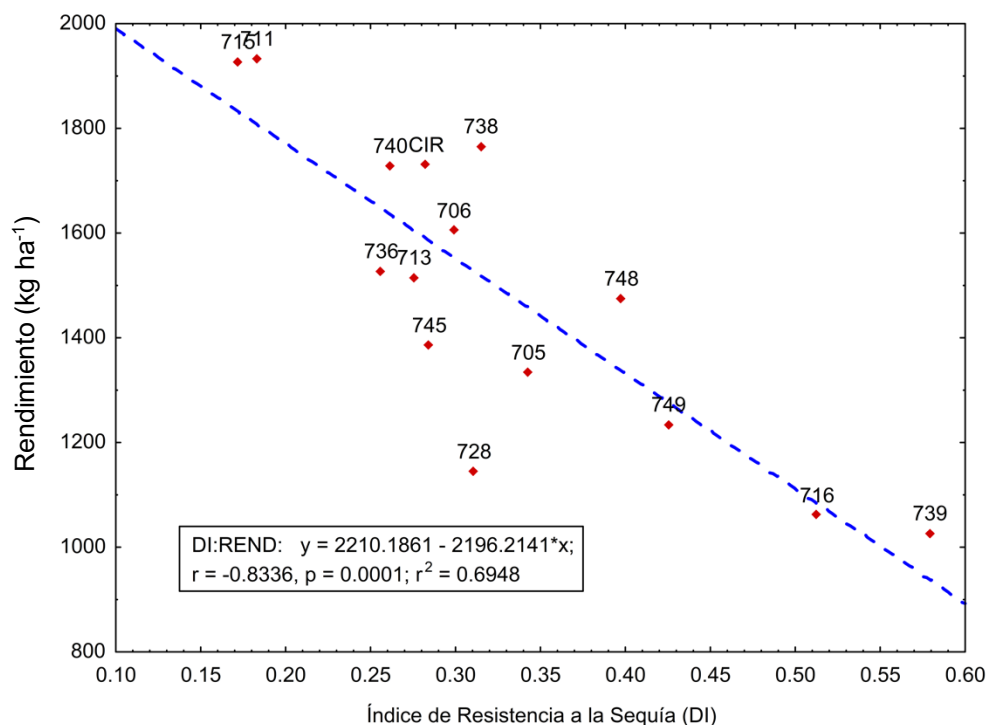


Figura 12. Relación entre el índice de sequía DI y el rendimiento de grano en Zaragoza Coah., ciclo O-I 2023-2024.

La evaluación de los índices de sequía en Zaragoza, Coahuila, evidenció que esta localidad permitió una diferenciación clara entre genotipos, reflejada en asociaciones moderadas a altas con el rendimiento de grano. Los índices STI y MP mostraron las mayores capacidades predictivas ($R^2 = 0.89$ y 0.79 , respectivamente), al integrar de manera efectiva tanto el potencial productivo como la estabilidad frente al estrés hídrico. Los índices YSI, SSI y DI también presentaron asociaciones sólidas (R^2 entre 0.69 y 0.70), destacando su utilidad para identificar genotipos capaces de mantener proporcionalmente su rendimiento bajo condiciones de sequía. En contraste, TOL mostró una relación moderada ($R^2 = 0.43$), lo que confirma que los índices basados únicamente en la pérdida absoluta de rendimiento son menos consistentes para predecir la productividad final.

En cuanto al comportamiento de los genotipos, las líneas 711 y 715 fueron consistentemente las más destacadas, combinando altos rendimientos y bajos valores en los índices de sensibilidad, lo que confirma su superioridad en estabilidad y tolerancia al déficit hídrico. La línea 738 y la variedad CIRNO mostraron un buen desempeño global, aunque con mayor reducción relativa frente al estrés, mientras que la línea 728 evidenció la menor adaptabilidad en ambos ambientes. Estos resultados confirman que la selección basada en índices combinados, especialmente STI y YSI complementándose con los índices MP, SSI y DI, los cuales tuvieron asociación altamente significativa, permite identificar de manera más precisa los materiales con mayor resiliencia productiva, fortaleciendo su aplicación en programas de mejoramiento enfocados a regiones con disponibilidad variable de agua (Fernandez, 1993; Blum, 2011; Mohammadi y Abdulahi, 2017).

Validación de índices de sequía para la selección de genotipos en promedio de las localidades.

El análisis de los índices de sequía promediando las dos localidades evaluadas, Navidad (N.L.) y Zaragoza (Coah.), permite integrar la información generada en ambientes contrastantes para obtener una visión global del comportamiento de los genotipos. Este enfoque es fundamental en la evaluación de tolerancia a sequía, ya que reduce el sesgo que podrían generar las condiciones particulares de cada sitio y resalta los materiales con desempeño estable y competitivo en distintos escenarios productivos, al considerar conjuntamente los rendimientos obtenidos bajo condiciones óptimas y de estrés hídrico en ambas localidades, se favorece la identificación de genotipos que combinan alto potencial productivo con resiliencia frente a la variabilidad ambiental (Blum, 2011; Bänziger *et al.*, 2000).

El análisis de varianza del modelo de regresión lineal simple mostró efectos significativos de todos los índices de sequía sobre el rendimiento de grano bajo condiciones de déficit hídrico en ambas localidades (Cuadro 20). Entre los índices

evaluados, el STI presentó el mayor coeficiente de determinación ($R^2= 0.64$), seguido por YSI ($R^2= 0.57$). Los resultados confirman que estos índices explican la variación del rendimiento en condiciones de déficit hídrico, tal como lo han documentado Fernández (1993) y Ahmad *et al.* (2022) en trigo bajo estrés hídrico de moderado a severo. Estos índices muestran la mejor asociación con el rendimiento bajo estrés hídrico, ya que integran tanto el potencial productivo como la estabilidad del rendimiento. En este contexto, el STI identifica genotipos con alto desempeño en ambos ambientes, mientras que el YSI refleja la capacidad de mantener el rendimiento bajo déficit, lo que explica su alta correlación con el rendimiento en condiciones limitantes (Ahmad *et al.*, 2022)

El DI ($R^2= 0.56$) y el SSI ($R^2= 0.56$) también mostraron un poder predictivo sólido, indicando que una mayor susceptibilidad se asocia con un menor rendimiento (Fisher y Maurer, 1978). El MP ($R^2=0.51$) presentó una asociación ligeramente menor, aunque confirma su utilidad como índice combinado de productividad. Su valor de R^2 es comparable ya que se fundamenta en el mismo par de condiciones de evaluación (rendimiento bajo riego óptimo y rendimiento bajo estrés), las cuales capturan la respuesta global del genotipo a la disponibilidad de agua. No obstante, su enfoque es distinto, ya que refleja la capacidad del genotipo para mantener un desempeño estable y balanceado entre ambientes contrastantes. En tanto que, el TOL ($R^2=0.35$) presentó la menor asociación, evidenciando que la pérdida absoluta de rendimiento es un indicador menos consistente para discriminar tolerantes a sequía (Mohammadi y Prasanna, 2003).

En base a lo anterior, la capacidad de predicción de STI y YSI los convierte en herramientas destacadas para la identificación de genotipos de trigo con tolerancia al estrés hídrico. Aunque otros índices presentaron valores de R^2 cercanos, STI y YSI fueron seleccionados por su mayor uso y validación en estudios previos, así como por su capacidad para integrar de forma equilibrada el rendimiento bajo condiciones óptimas y bajo estrés, lo que los posiciona como predictores más robustos y ampliamente aceptados en la investigación agrícola (Farooq *et al.*, 2009).

Cuadro 20. Análisis de varianza y parámetros de regresión lineal simple de índices de sequía asociados al rendimiento de grano con déficit hídrico en promedio de las localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

FV	GL	STI	YSI	TOL	MP	SSI	DI	
REND(Ys) t ha ⁻¹	1	434649.00	384973.00	238349.00	348003.00	386817.00	384973.00	
RESIDUAL	13	18966.00	22787.00	34066.00	25631.00	22645.00	22787.00	
<i>p-value</i>		0.0004	** 0.0012	** 0.0202	* 0.0027	** 0.0012	** 0.0012	**
β_0		500.10	497.70	1480.14	-113.27	1572.97	1571.47	
β_1		1079.80	1073.80	-0.42	0.88	-356.01	-1073.77	
R ²		0.64	0.57	0.35	0.51	0.56	0.56	

FV= fuentes de variación; GL= grados de libertad; STI= índice de tolerancia al estrés; YSI= índice de estabilidad del rendimiento; TOL= índice de tolerancia; MP= índice de productividad media; SSI= índice de susceptibilidad a la sequía; DI= índice de resistencia a sequía; REND(Ys) t ha⁻¹= rendimiento de grano bajo condiciones de sequía; β_0 = intercepto; β_1 = pendiente de la regresión; R²= coeficiente de determinación; **= significativo ($p \leq 0.01$); *= significativo ($p \leq 0.05$).

El STI mostró la mayor asociación con el rendimiento de grano ($R^2= 0.64$) y el mejor ajuste en la regresión lineal simple (Figura 13), lo cual se debe a su capacidad para integrar simultáneamente el desempeño del genotipo tanto en condiciones óptimas como bajo estrés hídrico. A diferencia de otros índices que se centran únicamente en la pérdida de rendimiento, el STI valora de forma conjunta la estabilidad y el potencial productivo, lo que incrementa su eficacia para predecir el comportamiento real de los genotipos en ambientes con disponibilidad variable de agua. Esta propiedad lo convierte en una herramienta útil para seleccionar materiales con alto rendimiento relativo y absoluto, especialmente bajo condiciones contrastantes (Mohammadi y Prasanna, 2003). En este estudio, las líneas 715 y 738 se ubicaron por encima de la línea de regresión, indicando un rendimiento superior al esperado para su valor de STI, lo cual sugiere una combinación favorable de productividad y tolerancia al estrés hídrico. En contraste, la línea 728 se situó por debajo de la predicción, reflejando una respuesta menos eficiente frente al déficit hídrico. Estas diferencias entre genotipos pueden atribuirse a su base genética y a su interacción con el ambiente, lo que coincide con lo reportado por Mohammadi y Prasanna (2003), quienes señalaron que la precisión del STI puede variar según el germoplasma y las condiciones de evaluación. El STI permite estimar de manera rápida y

cuantitativa la capacidad de un genotipo para mantener el rendimiento bajo estrés, siendo una herramienta clave en la selección temprana de materiales resilientes (Blum, 2011).

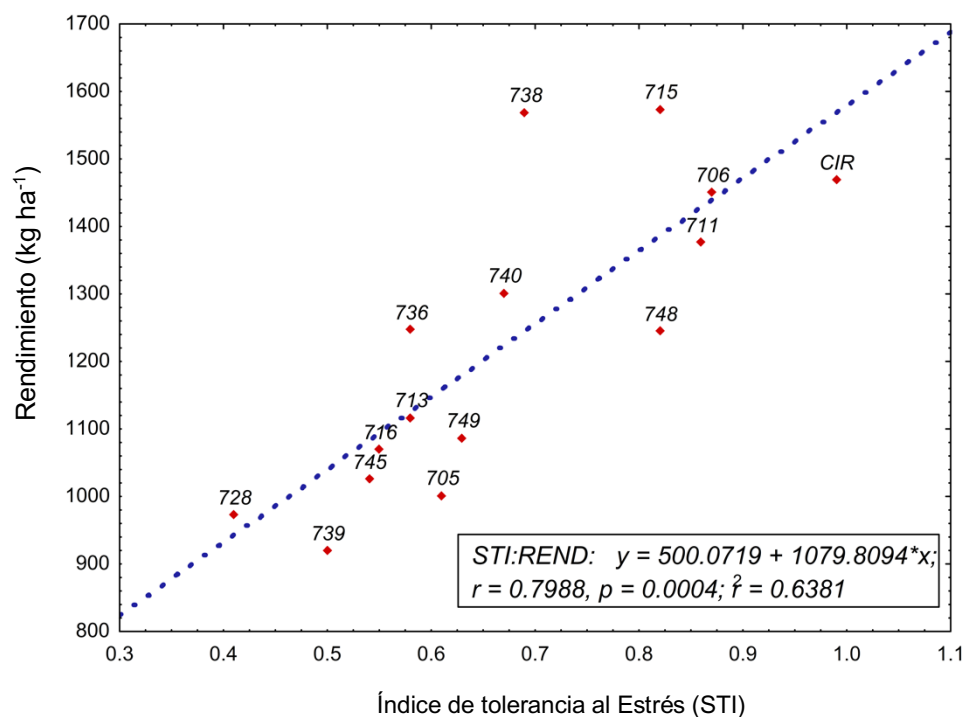


Figura 13. Relación entre el índice de sequía (STI) y el rendimiento de grano con déficit hídrico en promedio de las localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

El YSI mostró una asociación positiva y significativa con el rendimiento de grano bajo condiciones de déficit hídrico ($R^2 = 0.57$), como se observa en la ecuación de regresión lineal simple (Figura 14). Esta relación se debe a que el YSI cuantifica la proporción del rendimiento que un genotipo logra conservar al pasar de condiciones óptimas a condiciones de estrés, lo cual lo convierte en un indicador directo de estabilidad productiva frente a la sequía (Boslama y Schapaugh, 1984). Las líneas 715 y 738 destacaron en la parte superior de la regresión, indicando una alta eficiencia para mantener su productividad bajo estrés, lo que las posiciona como materiales promisorios para ambientes con escasez hídrica. Esta capacidad para conservar el rendimiento ha sido

reconocida como un atributo clave en programas de mejoramiento dirigidos a zonas semiáridas, donde la estabilidad relativa cobra mayor importancia que el rendimiento absoluto (Fang y Xiong, 2015). En conjunto, el índice YSI permite identificar genotipos con menor reducción de rendimiento por déficit hídrico, contribuyendo a la selección de materiales más resilientes y adaptados a condiciones limitantes.

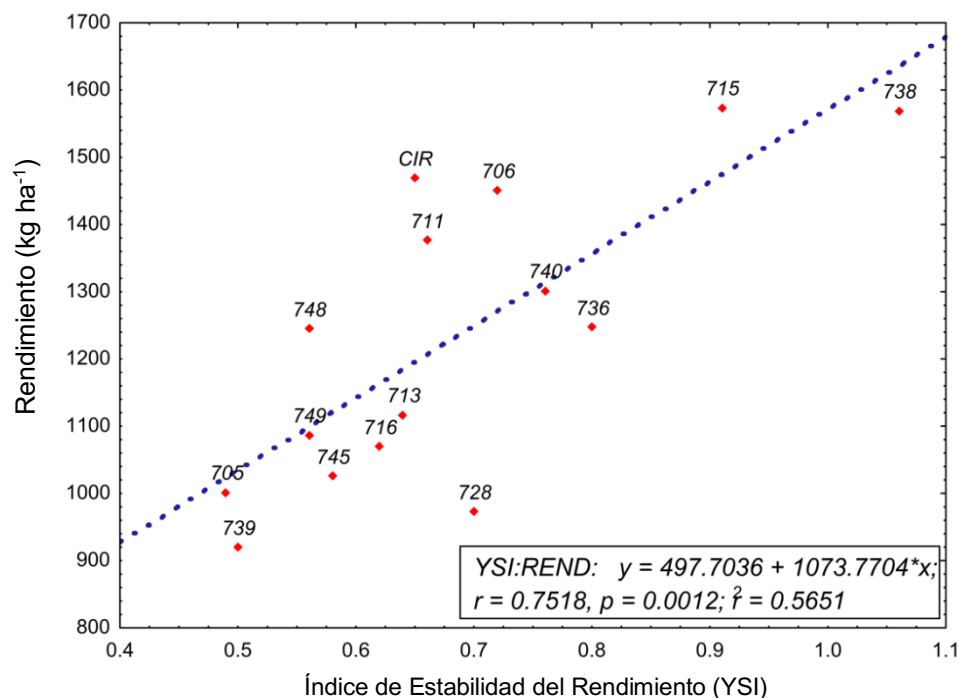


Figura 14. Relación entre el índice de sequía YSI y el rendimiento de grano en promedio de las localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

La regresión lineal entre TOL y el rendimiento de grano bajo condiciones de déficit (Figura 15) mostró una pendiente negativa significativa, lo que indica que un mayor valor de TOL, es decir, una mayor diferencia de rendimiento entre condiciones óptimas y baja disponibilidad hídrica se asocia con un menor rendimiento absoluto bajo estrés hídrico. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Rosielle y Hamblin (1981), quienes señalaron que valores elevados de TOL reflejan mayor susceptibilidad a condiciones limitantes, y, por tanto, menor adaptación al déficit hídrico. En este estudio, el coeficiente de

determinación ($R^2 = 0.35$) sugiere que TOL explica una parte moderada de la variabilidad en rendimiento bajo sequía, aunque con menor capacidad predictiva en comparación con otros índices como el STI, que integran simultáneamente estabilidad y potencial productivo (Fernandez, 1993; Nehe *et al.*, 2021). Aun así, TOL puede ser útil como indicador inicial de respuesta al estrés, especialmente cuando se combina con otros índices en un enfoque multivariado de selección. En este análisis, las líneas 715 y 738 registraron los valores más bajos de TOL, lo que refleja una menor reducción de rendimiento entre ambientes y, por ende, una mayor eficiencia para sostener la productividad bajo condiciones de déficit hídrico.

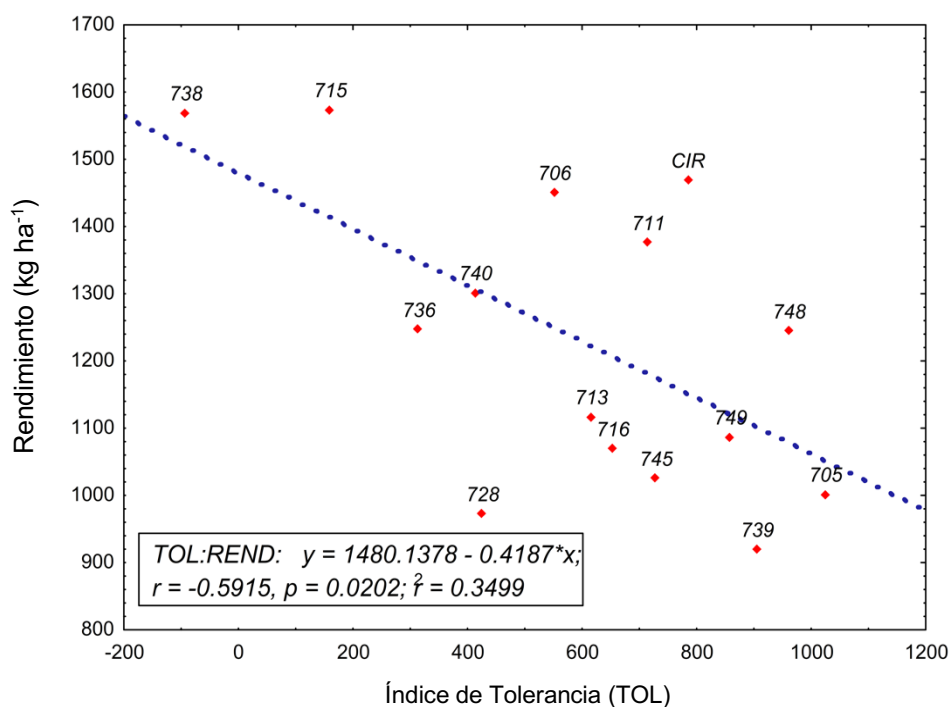


Figura 15. Relación entre el índice de sequía TOL y el rendimiento de grano en promedio de las localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

El MP, mostró una asociación positiva y significativa (Figura 16) con el rendimiento de grano bajo déficit hídrico ($R^2 = 0.51$), lo cual se asocia a que el MP calcula el promedio del desempeño en condiciones óptimas y baja disponibilidad hídrica, integrando de forma equilibrada ambos ambientes

(Fernandez, 1993). Esta dualidad permite reconocer genotipos que, además de producir bien en riego, mantienen un rendimiento relativamente alto cuando el agua escasea, fortaleciendo su capacidad predictiva frente a índices que solo consideran la pérdida o la diferencia de rendimiento (Fischer y Maurer, 1978; Rosielle & Hamblin, 1981). En este estudio, los materiales CIR, 711 y 706 registraron los valores más elevados de MP, demostrando un comportamiento estable y productivo en ambos escenarios. Asimismo, las líneas 715 y 738 se ubicaron por encima de la línea de regresión, con rendimientos superiores a los esperados para su nivel de MP, lo que sugiere una combinación de potencial de rendimiento y tolerancia a la sequía. Por el contrario, la línea 728 presentó el MP más bajo, reflejando una menor capacidad para sostener la productividad bajo estrés. Estos resultados confirman que el MP es un instrumento viable para la selección temprana de genotipos resilientes y justifica su inclusión prioritaria en esquemas multivariados de evaluación de desempeño en ambientes contrastantes (Nehe *et al.*, 2021).

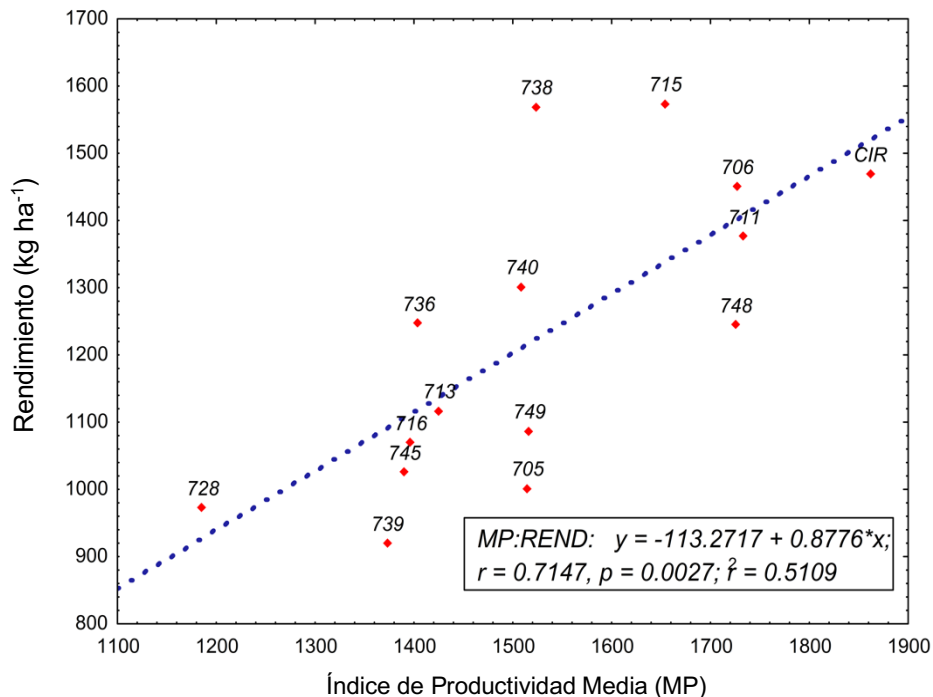


Figura 16. Relación entre el índice de sequía MP y el rendimiento de grano en promedio de las localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

El SSI presentó una asociación negativa y significativa (Figura 17) con el rendimiento de grano ($R^2 = 0.57$), lo cual se debe a que cuantifica la pérdida relativa de rendimiento entre condiciones óptimas y estresadas, penalizando a los genotipos más afectados por la sequía (Fischer & Maurer, 1978). Al centrarse en la magnitud de esta reducción, el SSI distingue de manera eficaz entre líneas que conservan su productividad y aquellas que sufren caídas pronunciadas, convirtiéndolo en un indicador robusto de desempeño bajo estrés hídrico (Fernandez, 1993; Rosielle y Hamblin, 1981). En este estudio, las líneas 738 y 715 registraron los valores de SSI más bajos y, en consecuencia, los rendimientos absolutos más altos, mientras que los genotipos con SSI elevado mostraron pérdidas de rendimiento sustanciales. Estos resultados avalan el uso prioritario del SSI, ya que permite identificar rápidamente los materiales menos susceptibles y acelerar el desarrollo de variedades resilientes en ambientes con disponibilidad de agua limitada (Nehe *et al.*, 2021).

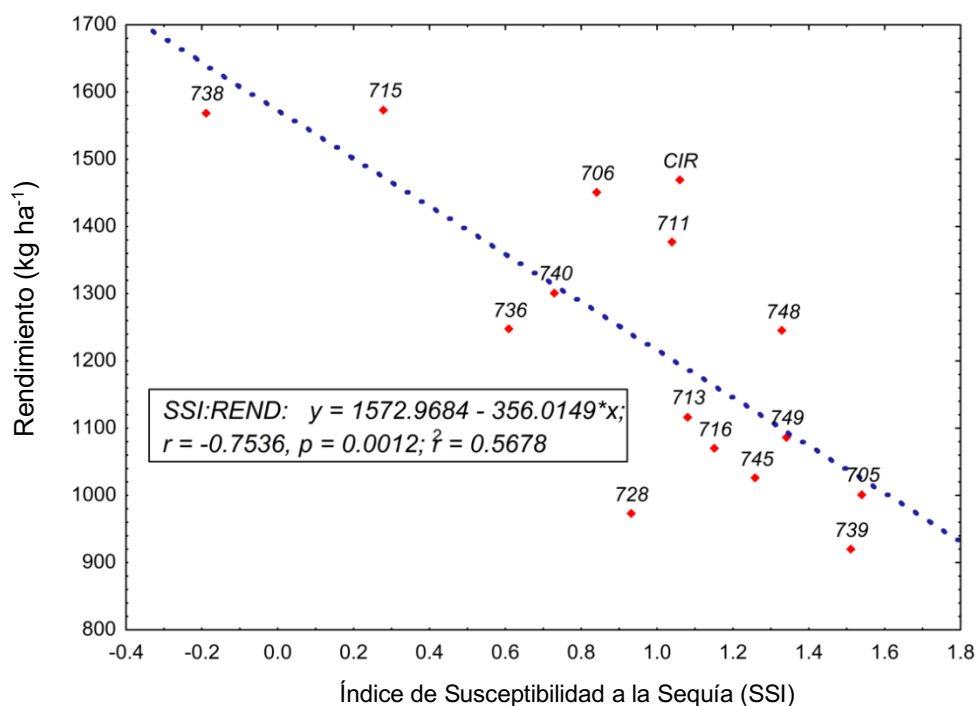


Figura 17. Relación entre el índice de sequía SSI y el rendimiento de grano en promedio de las localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

El DI, mostró una asociación negativa y significativa (Figura 18) con el rendimiento de grano bajo déficit hídrico ($R^2 = 0.57$), lo cual se asocia porque el DI cuantifica directamente la proporción de rendimiento perdido al transitar de condiciones óptimas a estresadas, reflejando con precisión la susceptibilidad del genotipo al déficit (Fischer y Maurer, 1978; Fernandez, 1992). Al centrarse en la magnitud de la reducción productiva, el DI distingue eficazmente a los materiales menos afectados por la sequía, convirtiéndose en un indicador confiable de desempeño en ambientes limitantes. En este estudio, nuevamente las líneas 738 y 715 presentaron los valores de DI más bajos y, consecuentemente, los rendimientos absolutos más altos, lo que evidencia su mayor capacidad para mitigar las pérdidas bajo estrés. Estos hallazgos respaldan la inclusión del DI en enfoques multivariados de selección temprana, donde su complementariedad con índices de estabilidad y potencial productivo optimiza la identificación de genotipos verdaderamente resilientes en zonas con baja disponibilidad de agua (Rosielle y Hamblin, 1981).

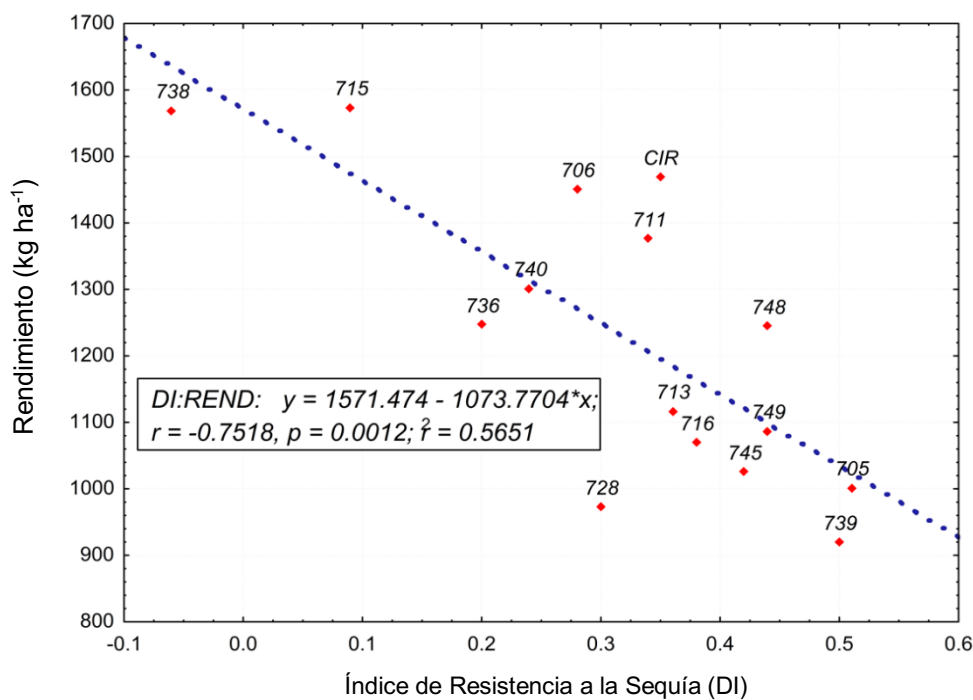


Figura 18. Relación entre el índice de sequía DI y el rendimiento de grano en promedio de las localidades durante el ciclo O-I 2023-2024.

Correlación entre índices de tolerancia a sequía y caracteres morfo-fisiológicos.

Se calcularon los coeficientes de correlación de Pearson entre los índices de tolerancia a la sequía (STI, YSI, TOL, MP, SSI y DI) y los caracteres evaluados (ALT, NDVI, TEM, LE, EE, GE, PGE, PHL, PMIL, REND y EM2) (Cuadro 21) con el objetivo de identificar los caracteres más asociados con los índices de sequía (Luo *et al.*, 2020).

Los resultados de este estudio confirman que REND está altamente asociado con los índices STI, YSI, MP, SSI, DI, $r = 0.80, 0.75, 0.71, -0.75, -0.75$, respectivamente. La fuerte correlación entre REND y dichos índices de sequía obedece a que todos estos índices se construyen integrando los valores de rendimiento bajo condiciones óptimas y de déficit de agua, por lo que la variación en REND explica directamente la mayor parte de la variabilidad de los índices (Luo *et al.*, 2020). Además, diversos estudios coinciden en que el rendimiento es la variable más robusta y de mayor valor agronómico para la identificación de genotipos tolerantes a la sequía (Mujtaba *et al.*, 2018; Sallam *et al.*, 2019). Desde el punto de vista fisiológico, los genotipos que mantienen altos rendimientos bajo estrés suelen exhibir mecanismos integrados como regulación estomática que equilibra el intercambio gaseoso y pérdida hídrica, y mantenimiento de la fotosíntesis durante el llenado de grano, estos procesos aseguran un llenado de grano eficiente pese a la limitación de agua, quedando reflejados en índices que ponderan rendimiento en ambos ambientes (Farooq *et al.*, 2009; Blum, 2011).

Por todo ello, diversos autores coinciden en que el rendimiento de grano es la variable más robusta y representativa para la identificación de genotipos tolerantes a la sequía, al incorporar de manera directa la respuesta global de la planta al déficit (Blum, 2011; Fischer & Maurer, 1978; Fernandez, 1992).

El PMIL y EM2 reflejan, desde distintos ángulos, la capacidad de una línea de trigo para mantener su potencial productivo bajo déficit hídrico, de ahí su fuerte correlación con índices de sequía. En el caso de PMIL, su correlación positiva con YSI ($r = 0.53$) y negativa con TOL ($r = -0.52$), SSI ($r = -0.54$) y DI ($r = -0.53$), sintetiza la eficacia en la remoción y asignación de fotoasimilados durante el

llenado de grano, fase especialmente sensible al estrés hídrico; los genotipos que conservan un llenado generoso exhiben menores caídas relativas de rendimiento (TOL y SSI negativos) y mayor estabilidad (YSI positiva), puesto que el índice cuantifica la relación entre rendimiento en estrés y en condiciones óptimas (Rosielle & Hamblin, 1981). Además, estudios fisiológicos muestran que un alto PMIL está asociado con una mejor eficiencia de uso del agua y mayor actividad enzimática en grano, lo que atenúa el impacto del déficit sobre la masa de grano (Blum, 2009).

Aunque la densidad de EM2 presentó correlaciones moderadas (STI y MP $r=0.54$), su papel no debe subestimarse: un mayor número de espigas asegura un umbral mínimo de rendimiento aun cuando la masa individual del grano disminuya bajo estrés, esto contribuye a la estabilidad del rendimiento en escenarios de sequía severa, tal como lo han demostrado estudios de fenotipado de alto rendimiento, donde la plasticidad de formación de espigas permite a ciertos materiales compensar pérdidas en número de granos mediante un mayor número de estructuras reproductivas (Correia *et al.*, 2022). Asimismo, ALT mostró una correlación negativa moderada negativa con TOL ($r = -0.48$), mientras que el resto de las asociaciones no resultaron significativas.

En conjunto, estos hallazgos sugieren que una estrategia de selección óptima para la tolerancia a la sequía en trigo debe de combinar: monitoreo de rendimiento de grano, como indicador global de resiliencia (Sallam *et al.*, 2019); evaluación del peso de mil semillas, para discriminar eficiencia en el llenado de grano y calidad de grano (Sehgal *et al.*, 2018) y cuantificación de la densidad de espigas, para garantizar estabilidad productiva bajo condiciones de baja disponibilidad hídrica (Correia *et al.*, 2022). Lo anterior, no solo mejora la precisión en la identificación de los materiales tolerantes, sino que facilita la combinación de rasgos fisiológicos y agronómicos en programas de mejoramiento en ambientes áridos y semiáridos (Pour-Aboughadareh *et al.*, 2020).

Cuadro 211. Análisis de correlación de Pearson entre índices de sequía, rendimiento y caracteres evaluados de líneas de trigo cristalino durante el ciclo O-I 2023-2024.

VAR	REND (kg ha ⁻¹)	PMIL (g)	EM2 (espigas· m ⁻²)	ALT (cm)	NDVI NDVI	LE (cm)	EE (espiguillas · espiga ⁻¹)	GE (granos· espiga ⁻¹)	PGE (g)	PHL (kg hL ⁻¹)
STI	0.79 **	0.10 ns	0.54 *	-0.24 ns	0.31 ns	-0.07 ns	-0.38 ns	-0.18 ns	-0.04 ns	-0.15 ns
YSI	0.75 **	0.52 *	0.40 ns	0.46 ns	0.36 ns	0.07 ns	-0.37 ns	-0.39 ns	0.28 ns	-0.22 ns
TOL	-0.59 *	-0.51 *	-0.25 ns	-0.47 *	-0.23 ns	-0.08 ns	0.29 ns	0.38 ns	-0.30 ns	0.13 ns
MP	0.71 **	0.06 ns	0.54 *	-0.27 ns	0.28 ns	-0.06 ns	-0.33 ns	-0.13 ns	-0.05 ns	-0.17 ns
SSI	-0.75 **	-0.53 *	-0.40 ns	-0.45 ns	-0.35 ns	-0.07 ns	0.38 ns	0.40 ns	-0.29 ns	0.01 ns
DI	-0.75 **	-0.52 *	-0.40 ns	-0.46 ns	-0.36 ns	-0.07 ns	0.37 ns	0.39 ns	-0.28 ns	0.22 ns

VAR= variable de correlación; r= coeficiente de correlación; ns= no significancia; **=altamente significativo ($p \leq 0.01$); *= significativo ($p \leq 0.05$).

Peso de mil semillas y espigas por metro cuadrado como criterios indirectos de selección para condiciones de déficit hídrico.

Los resultados obtenidos muestran que, además del rendimiento, tanto PMIL como EM2 presentaron las asociaciones más altas con los índices de sequía evaluados, lo que respalda su potencial como criterios indirectos de selección para tolerancia al déficit hídrico en trigo cristalino. Para sustentar esta relación, se realizaron análisis de regresión lineal empleando los índices con mayor capacidad predictiva (STI y YSI), confirmando que PMIL y EM2 mantienen una relación positiva y significativa con ambos, lo que sugiere que estos componentes del rendimiento están estrechamente vinculados, lo que las convierte en excelentes candidatos como criterios indirectos de tolerancia al déficit hídrico en trigo cristalino.

En el caso de PMIL (Cuadro 22), el modelo de regresión lineal que relaciona PMIL con el STI mostró un muy buen ajuste, explicando el 94.1% de la variación observada en PMIL ($R^2 = 0.941$), indicando que la capacidad de un genotipo para mantener un llenado de grano elevado bajo estrés se refleja de manera consistente en este índice (Fernández, 1992). Análogamente, el modelo de regresión de EM2 (Cuadro 22) mostró un bajo grado de ajuste: explicó el 26.6% de la variación observada en EM2 al relacionarse con el STI ($R^2 = 0.266$) y el 25.0% al relacionarse con el YSI ($R^2 = 0.250$). Esto evidencia que la persistencia

de las espigas bajo déficit hídrico es un mecanismo reproductivo de escape directamente capturado por los índices basados en rendimiento combinado y estabilidad (Fischer & Maurer, 1978; Blum, 2009). En conjunto, estos hallazgos justifican el uso de PMIL y EM2 como índices rápidos, de bajo costo y altamente predictivos para determinar la tolerancia a la sequía en programas de mejoramiento de trigo cristalino.

Cuadro 22. Análisis de varianza y parámetros de regresión lineal simple de los índices STI y YSI asociados al peso de mil semillas y espigas por metro cuadrado en condiciones de déficit hídrico.

FV	GL	STI	YSI	FV	STI	YSI
PMIL Ys	1	232.04	50.73	EM2 Ys	588.17	549.10
RESIDUAL	13	1.11	15.06	RESIDUAL	124.93	127.93
<i>p-value</i>		2.225e-09	** 0.08	<i>p-value</i>	0.049	* 0.048
β_0		14.87	2.21	β_0	88.49	90.09
β_1		17.624	31.837	β_1	31.40	28.77
R ²		0.941	0.205	R ²	0.266	0.250

FV= fuentes de variación; β_0 = intercepto; β_1 = pendiente de la regresión; R²= coeficiente de determinación; GL= grados de libertad; STI= índice de tolerancia a la sequía; YSI= índice de estabilidad del rendimiento.

Análisis de caracteres morfo-fisiológicos evaluados en invernadero ciclo O-I 2023-2024

El ANOVA (Cuadro 23), reveló que las interacciones dobles LIN x RG que resultaron significativas ($p \leq 0.05$) en este experimento correspondieron tanto a la biomasa de raíz (BRZ) como días a floración (DF). En el caso de BRZ, la interacción indica que la respuesta radicular varía según la combinación específica de línea genética y régimen de riego, sugiriendo que ciertos genotipos son capaces de incrementar o mantener su desarrollo de raíces de forma diferencial bajo distintos niveles de agua (Shamuyarira et al., 2023). De manera análoga, la interacción sobre DF indica que la duración del ciclo reproductivo varía según la combinación específica de genotipo y régimen de riego, esto sugiere que ciertos genotipos presentan una plasticidad fenológica que les permite ajustar la floración de manera diferencial bajo distintos niveles de

disponibilidad hídrica, optimizando la sincronización de fases críticas de desarrollo con el suministro de agua (Shamuyarira *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2013).

En cuanto al régimen de riego (RG), BRZ mostró un efecto altamente significativo ($p \leq 0.01$), lo que confirma que la disponibilidad de agua es determinante para el desarrollo radical, además, la respuesta plástica de la raíz a distintos niveles de riego con incrementos de biomasa subterránea en condiciones de déficit indica que un manejo hídrico adecuado puede potenciar la exploración del perfil del suelo y mejorar la eficiencia de uso del agua (Riaz *et al.*, 2013). De manera semejante, RG influyó de forma altamente significativa ($p \leq 0.01$) en LE, EE, GE, PGE, PMIL, el número de tallos por planta (TPTA), días a espigamiento (DE), DF, así como en la biomasa foliar (BF). Estos resultados ilustran que el agua suministrada durante el ciclo de cultivo modula tanto los órganos subterráneos como la expresión de rasgos reproductivos y de crecimiento general, tal como se ha documentado en condiciones controladas de invernadero (Blum, 2009). Por su parte, LIN ejerció un efecto altamente significativo sobre BRZ ($p \leq 0.01$), evidenciando claras diferencias hereditarias en la capacidad de desarrollo radical entre las líneas (Shamuyarira *et al.*, 2023). Asimismo, LIN influyó de manera altamente significativa ($p \leq 0.01$) en LE y de manera significativa ($p \leq 0.05$) en GE, lo que pone de manifiesto la variación genética en la arquitectura y potencial de formación de sitios de grano, atributos fundamentales para la productividad en ambientes con estrés hídrico (Mutanda *et al.*, 2025). Por otro lado, dado que el ANOVA mostró que GE presentó efectos significativos en líneas ($p \leq 0.01$) y riego ($p \leq 0.01$), mientras que PGE respondió únicamente al régimen de riego ($p \leq 0.01$) y no mostró variación genética entre las líneas evaluadas. Sugiere que, aunque el número de granos por espiga está condicionado por la herencia y la disponibilidad de agua, el peso de grano por espiga depende principalmente del manejo hídrico (Zhang *et al.*, 2013). En consecuencia, las líneas con mayor BRZ mantuvieron valores elevados de GE bajo déficit hídrico, respaldando la idea de que un sistema radical vigoroso sostiene el proceso de llenado de espiga. Sin embargo, dado que PGE no varió entre genotipos, la selección genética debería

enfocarse en incrementar GE, mientras que el ajuste de riego puede optimizar el tamaño de grano (Riaz *et al.*, 2013).

En conjunto, estos hallazgos respaldan la incorporación de la biomasa de raíz como criterio principal de selección en programas de mejoramiento para zonas áridas, complementada con los resultados de los caracteres evaluados para asegurar un equilibrio óptimo entre la asignación de recursos subterráneos y la productividad de grano (Wang *et al.*, 2024).

Cuadro 22. Análisis de varianza para caracteres evaluados en invernadero de líneas de trigo cristalino durante el ciclo OI 2023-2024.

FV	GL NUM	GL DEN	ALT (cm)	LE (cm)	EE (espiguillas* Espiga ⁻¹)	GE (granos* Espiga ⁻¹)	PGE (g)	PMIL (g)	TPTA (tallos* Planta ⁻¹)	DE (días)	DF (días)	BF (g)	BRZ (g)											
LIN	14	29	39.65	ns	0.97	**	7.72	ns	176.15	*	0.28	ns	235.4	ns	21.7	ns	23.06	ns	17.2	ns	22.6	ns	0.23	**
RG	1	29	2297.73	**	2.99	**	61.67	**	2098.64	**	10.30	**	3420.5	**	707.27	**	380.02	**	400.42	**	1540.27	**	2.60	**
LIN x RG	14	29	22.94	ns	0.32	ns	5.25	ns	114.23	ns	0.20	ns	224	ns	6.27	ns	23.16	ns	21.49	*	8.77	ns	0.20	*
BLK	-	-	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0.64$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=1.92$	$\sigma^2=2.44$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$	$\sigma^2=0$
test LRT	-	-	$\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0.009$ p=0.92	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0.13$ p=0.71	ns $\chi^2=7.19$ p=0.007	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	ns $\chi^2=0$ p=1	
error	-	-	$\sigma^2=4.46$	$\sigma^2=0.52$	$\sigma^2=2.00$	$\sigma^2=9.15$	$\sigma^2=0.38$	$\sigma^2=13.23$	$\sigma^2=3.94$	$\sigma^2=3.48$	$\sigma^2=3.206$	$\sigma^2=3.36$	$\sigma^2=0.282$											
C.V.	-	-	6.018	8.79	12.79	34.12	52.09	49.14	31.40	4.41	3.68	24.21	52.16											

FV= fuentes de variación de correlación; GL NUM= grados de libertad del numerador; GL DEN= grados de libertad del denominador; ALT= altura; LE= longitud de espiga; EE= espiguillas por espiga; GE= granos por espiga; PGE= peso de grano por espiga; PMIL= peso de mil semillas; TPTA= tallos por planta; DE= días a espigamiento; DF= días a floración; BF= biomasa foliar; BRZ= biomasa de raíz; LIN= líneas; RG= riegos; LIN x RG= interacción línea por riego; BLK= bloque; C.V.= coeficiente de variación; ns= no significancia; **=altamente significativo ($p \leq 0.01$); *= significativo ($p \leq 0.05$).

En la comparación de medias entre líneas (Cuadro 24), se encontraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para las variables: LE y BRZ. Para los caracteres evaluados, las líneas 716 (1.02 g), 749 (0.97 g) y 715 (0.95 g) exhibieron valores de BRZ significativamente superiores, lo que, de acuerdo con Shamuyarira *et al.* (2023), se asocia con una mayor capacidad de exploración de perfil y una captación más eficiente de agua bajo condiciones de estrés. La línea 739, además de presentar una BRZ competitiva, destacó por su mayor biomasa foliar (BF = 18.00 g), evidenciando una elevada capacidad fotosintética para sostener la formación y llenado de granos (Blum, 2009), aun cuando no se detectaron diferencias significativas para esta variable. Asimismo, la LE más alta correspondió a la 711 (6.88 cm), seguida por la 736 (6.84 cm), lo que, de acuerdo con Singh *et al.* (2018), sugiere una arquitectura de espiga que maximiza sitios de grano potenciales.

Si bien en la mayoría de las variables evaluadas no se detectaron diferencias significativas en las líneas, algunas mostraron valores numéricamente destacados. Tal es el caso de la línea 738, que alcanzó 39.8 GE, en concordancia con lo señalado por Comas *et al.* (2013), quienes indican que raíces profundas favorecen un llenado más eficiente de la espiga. En cuanto a PGE, la variedad CIRNO obtuvo un valor mayor (0.89 g), mientras que para el PMIL la línea 749 sobresalió con 38.08 g; ambos parámetros son indicadores de una mayor eficacia en la acumulación de materia seca en el grano (Zhang *et al.*, 2013). Adicionalmente, la densidad de TPTA y EE alcanzaron sus máximos valores en la 739 (15.0 tallos) y la 713 (19.2 espiguillas), respectivamente, lo que incrementa la diversidad de sitios reproductivos y, en consecuencia, el potencial de rendimiento.

Cuadro 23. Comparación de medias para caracteres evaluados de líneas de trigo cristalino en invernadero durante el ciclo O-I 2023-2024.

LIN	LE (cm)	LIN	GE (granos*espiga ⁻¹)	LIN	ALT (cm)	LIN	BF (g)	LIN	DE (días)	LIN	DF (días)	LIN	BRZ (g)	LIN	PGE (g)	LIN	PMIL (g)	LIN	TPTA (tallos)	LIN	EE (espiguillas*espiga ⁻¹)
711	6.88 ^a	738	39.80 ^a	740	79.9 ^a	739	18 ^a	739	82.50 ^a	739	90.20 ^a	716	1.02 ^a	CIR	0.89 ^a	749	38.08 ^a	739	15.00 ^a	713	19.20 ^a
736	6.84 ^a	706	33.80 ^a	739	78.1 ^a	748	17.8 ^a	748	82.00 ^a	748	89.50 ^a	749	0.97 ^{ab}	705	0.84 ^a	715	36.66 ^a	736	14.75 ^a	711	16.80 ^a
CIR	6.38 ^{ab}	713	32.90 ^a	715	76.5 ^a	CIR	17.2 ^a	711	81.80 ^a	CIR	89.50 ^a	715	0.95 ^{ab}	706	1.07 ^a	728	34.02 ^a	748	14.50 ^a	705	16.60 ^a
715	6.26 ^{ab}	748	32.00 ^a	738	76.3 ^a	705	15.2 ^a	CIR	81.50 ^a	711	89.00 ^a	711	0.55 ^{ab}	711	0.84 ^a	706	33.28 ^a	CIR	14.25 ^a	738	16.30 ^a
713	6.22 ^{ab}	711	29.80 ^a	705	75.7 ^a	745	14.8 ^a	715	80.00 ^a	745	88.50 ^a	706	0.52 ^{ab}	713	0.57 ^a	748	32.41 ^a	715	14.25 ^a	CIR	16.20 ^a
738	6.15 ^{ab}	736	29.30 ^a	716	75.7 ^a	715	14.8 ^a	738	79.50 ^a	715	88.20 ^a	CIR	0.50 ^{ab}	715	0.67 ^a	705	29.64 ^a	705	14.25 ^a	749	16.00 ^a
705	6.13 ^{ab}	CIR	29.10 ^a	736	75.1 ^a	736	14.5 ^a	736	79.00 ^a	736	87.80 ^a	745	0.47 ^{ab}	716	0.56 ^a	CIR	27.73 ^a	740	13.75 ^a	736	15.80 ^a
749	6.04 ^{ab}	740	28.40 ^a	748	75 ^a	740	13 ^a	745	78.80 ^a	749	86.80 ^a	740	0.47 ^{ab}	728	0.84 ^a	711	26.55 ^a	745	13.25 ^a	715	15.70 ^a
740	5.84 ^{ab}	705	26.80 ^a	745	74.7 ^a	711	13 ^a	740	78.80 ^a	738	86.80 ^a	748	0.47 ^{ab}	736	0.73 ^a	738	26.30 ^a	713	13.00 ^a	706	15.40 ^a
706	5.67 ^{ab}	728	23.70 ^a	711	74.1 ^a	738	12.5 ^a	749	78.50 ^a	740	86.50 ^a	736	0.45 ^{ab}	738	1.03 ^a	736	24.96 ^a	706	12.50 ^a	716	15.30 ^a
739	5.59 ^{ab}	716	23.30 ^a	713	72.1 ^a	728	12.2 ^a	716	77.80 ^a	716	85.50 ^a	705	0.42 ^{ab}	739	0.16 ^a	716	24.48 ^a	711	11.75 ^a	745	15.20 ^a
745	5.57 ^{ab}	745	21.10 ^a	706	71 ^a	713	12 ^a	713	77.80 ^a	728	85.20 ^a	738	0.40 ^{ab}	740	0.73 ^a	740	23.30 ^a	728	11.50 ^a	748	15.20 ^a
728	5.44 ^{ab}	739	18.50 ^a	728	71 ^a	749	11.5 ^a	706	76.00 ^a	705	84.80 ^a	739	0.37 ^{ab}	745	0.51 ^a	745	19.40 ^a	749	9.50 ^a	740	14.10 ^a
716	5.42 ^{ab}	749	17.50 ^a	749	70.5 ^a	716	11.2 ^a	728	75.00 ^a	713	84.20 ^a	713	0.32 ^{ab}	748	1.24 ^a	713	17.66 ^a	716	8.50 ^a	739	13.70 ^a
748	5.29 ^b	715	16.60 ^a	CIR	68.2 ^a	706	10.8 ^a	705	75.00 ^a	706	83.80 ^a	728	0.20 ^b	749	0.55 ^a	739	9.32 ^a	738	7.75 ^a	728	13.50 ^a

ALT= altura; LE= longitud de espiga; EE= espiguillas por espiga; GE= granos por espiga; PGE= peso de grano por espiga; PMIL= peso de mil semillas; TPTA= tallos por planta; DE= días a espigamiento; DF= días a floración; BF= biomasa foliar; BRZ= biomasa de raíz. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

En síntesis, las líneas evaluadas muestran un conjunto de rasgos complementarios que favorecen la adaptación al estrés hídrico. Las líneas 716, 749 y 715 presentaron raíces profundas, mientras que 738 destacó por su alta prolificidad de granos

y 711 por espigas más largas. Asimismo, 739, 748 y CIRNO exhibieron biomasa foliar vigorosa, y 715 y 749 mostraron PMIL superior. La combinación de un desarrollo radicular eficiente con una estructura aérea y reproductiva favorable refleja un patrón de adaptación integrado al déficit hídrico (Comas *et al.*, 2013; Lynch, 2019). Por estas razones, las líneas CIRNO, 711, 715, 716, 738, 739 y 749 se consideran candidatas prioritarias para su incorporación en programas de mejoramiento de trigo cristalino destinados a regiones áridas y semiáridas.

En cuanto a la comparación de regímenes de riego (Cuadro 26), todas las variables evaluadas fueron significativamente mayores bajo el riego con mayor disponibilidad hídrica (RG1) frente al riego con déficit (RG2). Bajo RG1, la altura de planta (ALT) alcanzó 80.40 cm, la LE fue de 6.20 cm, y la biomasa de raíz (BRZ) se duplicó (0.75 g). Asimismo, la biomasa fresca (BF), los componentes fenológicos (DE, DF) y los caracteres reproductivos (EE, GE, PGE, PMIL, TPTA) mostraron mejoras significativas con suministro hídrico completo. Estos resultados concuerdan con Farooq *et al.* (2009), quienes documentaron que la reducción en la disponibilidad de agua disminuye tanto el crecimiento aéreo como subterráneo, afecta el ciclo fenológico y limita el número y peso de granos en trigo. Por tanto, el manejo del riego no solo modula la productividad de grano, sino que también es determinante en el balance vegetativo reproductivo y en el desarrollo radicular, aspecto crucial para la tolerancia a sequía en entornos semiáridos.

Cuadro 24. Comparación de medias de riegos para caracteres evaluados en invernadero durante el ciclo OI 2023-2024.

RG	ALT (cm)	LE (cm)	EE (espiguillas• espiga ⁻¹)	GE (granos• espiga ⁻¹)	PGE (g)	PMIL (g)	TPTA (tallos)	DE (días)	DF (días)	BF (g)	BRZ (g)
1	80.4 ^a	6.20 ^a	16.70 ^a	32.70 ^a	1.16 ^a	34.50 ^a	16.00 ^a	81.40 ^a	89.70 ^a	18.97 ^a	0.75 ^a
2	60.1 ^b	5.76 ^b	14.70 ^b	20.90 ^b	0.33 ^b	19.40 ^b	9.13 ^b	76.40 ^b	94.50 ^b	8.83 ^b	0.33 ^b

RG= riegos; ALT= altura; LE= longitud de espiga; EE= espiguillas por espiga; GE= granos por espiga; PGE= peso de grano por espiga; PMIL= peso de mil semillas; TPTA= tallos por planta; DE= días a espigamiento; DF= días a floración; BF= biomasa fresca; BRZ= biomasa de raíz; medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

El análisis de correlación entre BRZ y los caracteres evaluados (Cuadro 26), mostró que las diferencias genotípicas observadas en BRZ están significativamente asociadas con otros rasgos morfo-fisiológicos clave, lo que refuerza su utilidad como criterio indirecto en la selección por tolerancia a sequía. Específicamente, BRZ se correlacionó de manera positiva y significativa ($p \leq 0.01$) con altura de planta ($r = 0.39$), número de DE ($r = 0.413$), DF ($r = 0.39$) y BF ($r = 0.39$). Esto sugiere que un sistema radical más desarrollado puede estar vinculado a un ciclo vegetativo más largo y a un mayor acúmulo de biomasa aérea, permitiendo una mejor exploración del perfil del suelo y una prolongación de la actividad fisiológica bajo condiciones limitantes (Shamuyarira *et al.*, 2023; Blum, 2009).

Aun cuando las correlaciones entre BRZ y variables reproductivas como GE ($r = 0.11$), PMIL ($r = 0.18$), PGE ($r = 0.22$), LE ($r = 0.10$), no fueron estadísticamente significativas, su tendencia positiva sugiere una posible asociación que podría hacerse más evidente en condiciones de campo o estrés prolongado. Estas correlaciones débiles podrían también indicar una compensación entre asignación de recursos a estructuras reproductivas frente a desarrollo radicular (Lynch, 2019).

Cuadro 25. Análisis de correlación de Pearson entre Biomasa de raíz y caracteres evaluados de líneas de trigo cristalino en invernadero durante el ciclo O-I 2023-2024.

VAR	ALT (cm)	LE (cm)	EE (espiguillas* espiga ⁻¹)	GE (granos/ espiga)	PGE (g)	PMIL (g)	TPTA (tallos/ planta)	DE (días)	DF (días)	BF (g)										
BRZ (r)	0.39	**	0.10	ns	0.13	ns	0.11	ns	0.22	ns	0.18	ns	0.23	ns	0.41	**	0.39	**	0.39	**

VAR= variable de correlación; r= coeficiente de correlación; ns= no significancia; **=altamente significativo ($p \leq 0.01$); *= significativo ($p \leq 0.05$).

Al integrar los resultados de las tres evaluaciones PV-2023, O-I 2023-2024 en dos localidades e invernadero en Saltillo, se observa una relación consistente entre los índices de sequía, las líneas evaluadas, los niveles de riego y las variables morfo-fisiológicas. En campo, los índices STI y YSI fueron los más confiables para predecir el rendimiento bajo déficit, coincidiendo con la selección de las líneas 706, 711, 715, 738, 748 y 749 como las de mejor desempeño. Estas líneas mantuvieron estabilidad frente a la variación de lámina de riego y localidad, respaldadas por caracteres asociados como el peso de grano por espiga, NDVI, peso de mil semillas (PMIL) y número de espigas por metro cuadrado (EM2). En invernadero, las mismas líneas mostraron mayor biomasa seca de raíz, correlacionada positivamente con biomasa aérea y altura de planta, evidenciando un sistema radical eficiente para la extracción de agua y la prolongación de la actividad fotosintética bajo estrés. Esta integración de resultados confirma que la combinación de índices de sequía con variables morfo-fisiológicas permite identificar genotipos de trigo cristalino estables, productivos y adaptados a condiciones de estrés hídrico, reforzando su valor para programas de mejoramiento orientados a zonas áridas.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que los índices de tolerancia al estrés hídrico STI y YSI complementados con los índices SSI y DI, son las herramientas más precisas y operativamente viables para predecir el rendimiento de trigo cristalino (*Triticum durum* L.) bajo condiciones de baja disponibilidad de agua, reflejando los mayores coeficientes de determinación en los modelos de regresión elaborados. Asimismo, caracteres de fácil medición como el peso de mil semillas (PMIL) y la densidad de espigas por metro cuadrado (EM2) mostraron alta correlación tanto con los índices de sequía STI/YSI, así como con el rendimiento correlacionado de manera altamente significativa con STI, YSI y MP; una correlación negativa con SSI y DI; y una correlación moderada y negativa con TOL, lo que respalda su incorporación como criterios rápidos y de bajo costo en las etapas tempranas de selección de genotipos.

Las líneas 706, 711, 715, 738, 748 y 749 combinaron rendimiento sobresaliente con estabilidad ante variaciones en el riego, lo que les permitió posicionarse de manera consistente entre los materiales más tolerantes. La evaluación en invernadero confirmó estos hallazgos al revelar que dichas líneas presentan sistemas radiculares más desarrollados, cuya mayor exploración del perfil del suelo se traduce en un sostenimiento efectivo de la actividad fotosintética y la biomasa aérea bajo condiciones de estrés hídrico.

En conjunto, la coherencia entre los resultados de campo e invernadero avala la robustez del esquema de selección propuesto, la combinación de índices de sequía validados y variables morfo-fisiológicas permite identificar genotipos de trigo cristalino estables, productivos y con raíces vigorosas. Por tanto, las líneas mencionadas junto con la variedad testigo CIRNO se perfilan como materiales prioritarios para ensayos en las regiones áridas y semi áridas del norte de Coahuila, y su incorporación en los programas de mejoramiento garantizará el desarrollo de variedades de trigo cristalino adaptadas al déficit hídrico, asegurando la productividad y la estabilidad en estos ambientes.

REFERNCIAS

- Ahmad, A., Aslam, Z., Javed, T., Hussain, S., Raza, A., Shabbir, R., & Tauseef, M. (2022). Screening of wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought tolerance through agronomic and physiological response. *Agronomy*, 12(2), 287.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12020287>
- Alhag, D. D., Rashidi, V., Aharizad, S., Farahvash, F., & Mirshekari, B. (2022). The traits affecting wheat grain yield and determining tolerant genotypes using drought indices. *Cereal Research Communications*, 50(4), 627-636.
<https://doi.org/10.1007/s42976-021-00225-2>
- Aparicio, N., Villegas, D., Casadesus, J., Araus, J. L., & Royo, C. (2000). Spectral vegetation indices as nondestructive tools for determining durum wheat yield. *Agronomy Journal*, 92(1), 83-91.
<https://doi.org/10.2134/agronj2000.92183x>
- Araus, J. L., & Cairns, J. E. (2014). Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends in plant science*, 19(1), 52-61.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.09.008>
- Asseng, S., Martre, P., Maiorano, A., Rötter, R. P., O'Leary, G. J., Fitzgerald, G. J., ... & Ewert, F. (2019). Climate change impact and adaptation for wheat protein. *Global change biology*, 25(1), 155-173.
<https://doi.org/10.1111/gcb.14481>
- Ayed, S., Bouhaouel, I., Othmani, A., & Bassi, F. M. (2021). Use of wild relatives in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum Desf.) breeding program: Adaptation and stability in context of contrasting environments in Tunisia. *Agronomy*, 11(9), 1782.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11091782>
- Bänzinger, M. (2000). Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize: From theory to practice. CIMMYT.
- Bayissa, T., Mengistu, G., Gerema, G., Balcha, U., Feyisa, H., Kedir, A., ... & Jobe, T. (2023). Genotype × environment interaction of lowland bread

- wheat varieties for irrigation in different areas of Oromia. *Plant-Environment Interactions*, 4(1), 2-10. <https://doi.org/10.1002/pei3.10097>
- Giancaspro, A., Giove, S. L., Zacheo, S. A., Blanco, A., & Gadaleta, A. (2019). Genetic variation for protein content and yield-related traits in a durum population derived from an inter-specific cross between hexaploid and tetraploid wheat cultivars. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1509. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01509>
- Blum, A. (2011). *Plant breeding for water-limited environments*. Springer Science & Business Media.
- Bocianowski, J., Tratwal, A., & Nowosad, K. (2021). Genotype by environment interaction for main winter triticale varieties characteristics at two levels of technology using additive main effects and multiplicative interaction model. *Euphytica*, 217(2), 26. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-02756-x>
- Bousslama, M., & Schapaugh Jr, W. T. (1984). Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance. *Crop science*, 24(5), 933-937. <https://doi.org/10.2135/cropsci1984.0011183X002400050026x>
- Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo [CANIMOLT]. (2017). Reporte estadístico 2017 [Informe]. CANIMOLT. <https://www.canimolt.org/compendio-estadistico-completo>
- Chen, X., Zhu, Y., Ding, Y., Pan, R., Shen, W., Yu, X., & Xiong, F. (2021). The relationship between characteristics of root morphology and grain filling in wheat under drought stress. *PeerJ*, 9, e12015. <https://doi.org/10.7717/peerj.12015>
- Christopher, J. T., Christopher, M. J., Borrell, A. K., Fletcher, S., & Chenu, K. (2016). Stay-green traits to improve wheat adaptation in well-watered and water-limited environments. *Journal of experimental botany*, 67(17), 5159-5172. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw276>
- CIMMYT. (2021). La vinculación de la teoría y la práctica para potenciar la resiliencia climática del trigo [Informe]. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT).

<https://annualreport2021.cimmyt.org/la-vinculacion-de-la-teoria-y-la-practica-para-potenciar-la-resiliencia-climatica-del-trigo/>

- Comas, L. H., Becker, S. R., Cruz, V. M. V., Byrne, P. F., & Dierig, D. A. (2013). Root traits contributing to plant productivity under drought. *Frontiers in plant science*, 4, 442. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00442>
- Cooper, M., Gho, C., Leafgren, R., Tang, T., & Messina, C. (2020). Breeding drought-tolerant maize hybrids for the US corn-belt: discovery to product. *Journal of Experimental Botany*, 71(17), 4706–4715. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru064>
- Correia, P. M., Cairo Westergaard, J., Bernardes da Silva, A., Roitsch, T., Carmo-Silva, E., & Marques da Silva, J. (2022). High-throughput phenotyping of physiological traits for wheat resilience to high temperature and drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 73(15), 5235-5251. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac160>
- Cossani, C. M., & Reynolds, M. P. (2012). Physiological traits for improving heat tolerance in wheat. *Plant physiology*, 160(4), 1710-1718. <https://doi.org/10.1104/pp.112.207753>
- Denčić, S., Kastori, R., & Kobiljski, B. (2000). Evaluation of grain yield and its components in wheat cultivars and landraces under near-optimal and drought conditions. *Euphytica*, 113(1), 43–52. <https://doi.org/10.1023/A:1003997700865>
- Fang, Y., & Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cellular and molecular life sciences*, 72, 673-689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>
- Farokhzadeh, S., Fakheri, B. A., Mahdi Nezhad, N., Tahmasebi, S., & Mirsoleimani, A. (2020). Genetic dissection of spike-related traits in wheat (*Triticum aestivum* L.) under aluminum stress. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 67(5), 1221-1243. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-00907-6>

- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., Basra, S.M.A. (2009). Plant Drought Stress: Effects, Mechanisms and Management. In: Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Véronique, S., Alberola, C. (eds) Sustainable Agriculture. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12
- Fernandez, G. C. J. (1993). Effective selection criteria for assessing plant stress tolerance. In C. G. Kuo (Ed.), Adaptation of food crops to temperature and water stress: Proceedings of an international symposium, Taiwan, 13–18 August 1992 (pp. 257–270). Asian Vegetable Research and Development Center. <https://worldveg.tind.io/record/18578?ln=en>
- Fischer, R. A. (2007). Paper presented at international workshop on increasing wheat yield potential, CIMMYT, Obregon, Mexico, 20–24 March 2006 Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. The Journal of Agricultural Science, 145(2), 99–113. <https://doi.org/10.1017/S0021859607006843>
- Fischer, R. A., & Maurer, R. (1978). Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. Australian Journal of Agricultural Research, 29(5), 897-912. <https://doi.org/10.1071/AR9780897>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2020). World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2020 (ISSN 2225-7373). FAO.
- Gaju, O., Allard, V., Martre, P., Le Gouis, J., Moreau, D., Bogard, M., ... & Triboui, E. (2011). Identification of traits to improve the nitrogen-use efficiency of wheat genotypes. Field Crops Research, 123(2), 139–152. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.05.010>
- García Cruz, A., & Lozano Del Río, A. J. (2014). Comportamiento forrajero de familias F2: 7 de Triticale en comparación con sus progenitores en Zaragoza, Coahuila. <https://repositorio.uaaan.mx/handle/123456789/1156>
- Gauch Jr, H. G., & Zobel, R. W. (1997). Identifying mega-environments and targeting genotypes. Crop science, 37(2), 311-326. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700020002x>

- Golabadi, M., Arzani, A., & Maibody, S. A. M. (2006). Assessment of drought tolerance in segregating populations in durum wheat. *African Journal of Agricultural Research*, 1(5), 162–171.
- Gómez-Espejo, A. L., Sansaloni, C. P., Burgueño, J., Toledo, F. H., Benavides-Mendoza, A., & Reyes-Valdés, M. H. (2022). Worldwide Selection Footprints for Drought and Heat in Bread Wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plants*, 11(17), 2289. <https://doi.org/10.3390/plants11172289>
- Gupta, V., Kumar, M., Singh, V., Chaudhary, L., Yashveer, S., Sheoran, R., ... & Nagpal, S. (2022). Genotype by environment interaction analysis for grain yield of wheat (*Triticum aestivum* (L.) em. Thell) genotypes. *Agriculture*, 12(7), 1002. <https://doi.org/10.3390/agriculture12071002>
- Haile, J. K., N'Diaye, A., Walkowiak, S., Nilsen, K. T., Clarke, J. M., Kutcher, H. R., ... & Pozniak, C. J. (2019). Fusarium head blight in durum wheat: Recent status, breeding directions, and future research prospects. *Phytopathology*, 109(10), 1664-1675. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-19-0095-RVW>
- Hernández-Ochoa, I. M., Asseng, S., Kassie, T., Xiong, W., Robertson, R., Luz-Pequeño, D. N., Sonder, K., & Hoogenboom, G. (2018). Climate change impact on Mexico wheat production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 373–387. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.09.008>
- Insari, A. H., Khanzada, A. S., Qayyum, S. M., Qureshi, M. A., & Hassan, M. (1994). Interrelationship between grain yield and its components in wheat under various sowing methods and seed rates. *Journal of Agricultural Research (Pakistan)*, 32(4).
- Kobiljski, B., & Dencic, S. (2001). Global climate change: challenge for breeding and seed production of major field crops. *Journal of Genetics and Breeding*, 55(1), 83-90.
- Kyratzis, A. C., Skarlatos, D. P., Menexes, G. C., Vamvakousis, V. F., & Katsiotis, A. (2017). Assessment of vegetation indices derived by UAV imagery for

- durum wheat phenotyping under a water limited and heat stressed Mediterranean environment. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1114. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01114>
- Lamara, A., Fellahi, Z. E. A., Hannachi, A., & Benniou, R. (2022). Assessing the phenotypic variation, heritability and genetic advance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) candidate lines grown under rainfed semi-arid region of Algeria. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 75(3), 10107-10118. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v75n3.100638>
- Lan, T.-H. (1998). Drought resistance evaluation in wheat genotypes. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 180(3), 155–163.
- Liu, B., Martre, P., Ewert, F., Porter, J. R., Challinor, A. J., Müller, C., ... & Asseng, S. (2019). Global wheat production with 1.5 and 2.0° C above pre-industrial warming. *Global Change Biology*, 25(4), 1428-1444. <https://doi.org/10.1111/gcb.14542>
- Lobos, G. A., Matus, I., Rodriguez, A., Romero-Bravo, S., Araus, J. L., & del Pozo, A. (2014). Wheat genotypic variability in grain yield and carbon isotope discrimination under Mediterranean conditions assessed by spectral reflectance. *Journal of integrative plant biology*, 56(5), 470-479. <https://doi.org/10.1111/jipb.12114>
- Lopes, M. S., & Reynolds, M. P. (2011). Drought adaptive traits and wide adaptation in elite lines derived from resynthesized hexaploid wheat. *Crop Science*, 51(4), 1617-1626. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.07.0445>
- Lynch, J. P. (2019). Root phenotypes for improved nutrient capture: an underexploited opportunity for global agriculture. *New phytologist*, 223(2), 548-564. <https://doi.org/10.1111/nph.15738>
- Ma, Z., Zhao, D., Zhang, C., Zhang, Z., Xue, S., Lin, F., ... & Luo, Q. (2007). Molecular genetic analysis of five spike-related traits in wheat using RIL and immortalized F₂ populations. *Molecular Genetics and Genomics*, 277, 31-42. <https://doi.org/10.1007/s00438-006-0166-0>
- Maccaferri, M., Sanguineti, M. C., Demontis, A., El-Ahmed, A., Garcia del Moral, L., Maalouf, F., ... & Tuberosa, R. (2011). Association mapping in durum

- wheat grown across a broad range of water regimes. *Journal of experimental botany*, 62(2), 409-438. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq287>
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). (2012). Manual de determinación de rendimiento [Manual técnico]. CIMMYT. <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/18249/48867.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mdluli, S. Y. (2018). Characterisation of Selected Bread Wheat (*Triticum Aestivum* L.) Genotypes for Drought Tolerance Based on SSR Markers, Morpho-physiological Traits and Drought Indices (Doctoral dissertation, University of KwaZulu-Natal, Pietermaritzburg).
- Moayed, A. A., Boyce, A. N., & Barakbah, S. S. (2010). Spike traits and characteristics of durum and bread wheat genotypes at different growth and developmental stages under water deficit conditions. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 4(2), 144-150.
- Mohammadi, R., & Abdulahi, A. (2017). Evaluation of durum wheat genotypes based on drought tolerance indices under different levels of drought stress. *Journal of Agricultural Sciences, Belgrade*, 62(1), 1-14. <https://doi.org/10.2298/JAS1701001M>
- Mohammadi, S. A., & Prasanna, B. M. (2003). Analysis of genetic diversity in crop plants—salient statistical tools and considerations. *Crop science*, 43(4), 1235-1248. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1235>
- Mohi-Ud-Din, M., Hossain, M. A., Rohman, M. M., Uddin, M. N., Haque, M. S., Ahmed, J. U., ... & Pessaraki, M. (2022). Canopy spectral reflectance indices correlate with yield traits variability in bread wheat genotypes under drought stress. *PeerJ*, 10, e14421. <https://doi.org/10.7717/peerj.14421>
- Mujtaba, S. M., Faisal, S., Khan, M. A., Shirazi, M. U., & Khan, M. A. (2018). Evaluation of drought tolerant wheat genotypes using morpho-physiological indices as screening tools. *Pakistan Journal of Botany*, 50(1), 51-58.
- Mutanda, M., Shimelis, H., Chaplot, V., & Figlan, S. (2025). Managing drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) production: strategies and

- impacts. *South African Journal of Plant and Soil*, 1-12.
<https://doi.org/10.1080/02571862.2025.2497229>
- Mwadzingeni, L., Shimelis, H., Tesfay, S., & Tsilo, T. J. (2016). Screening of bread wheat genotypes for drought tolerance using phenotypic and proline analyses. *Frontiers in plant science*, 7, 1276.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01276>
- Nachit, M. M., & Elouafi, I. (2004). Durum wheat adaptation in the Mediterranean dryland: Breeding, stress physiology, and molecular markers. *Challenges and strategies of dryland agriculture*, 32, 203-218.
<https://doi.org/10.2135/cssaspecpub32.c13>
- Nehe, A. S., Foulkes, M. J., Ozturk, I., Rasheed, A., York, L., Kefauver, S. C., ... & Morgounov, A. (2021). Root and canopy traits and adaptability genes explain drought tolerance responses in winter wheat. *PLoS One*, 16(4), e0242472. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0242472>
- Olivoto, T., Lúcio, A. D., da Silva, J. A., Marchioro, V. S., de Souza, V. Q., & Jost, E. (2019). Mean performance and stability in multi-environment trials I: combining features of AMMI and BLUP techniques. *Agronomy journal*, 111(6), 2949-2960. <https://doi.org/10.2134/agronj2019.03.0220>
- Passioura, J. B., & Angus, J. F. (2010). Improving productivity of crops in water-limited environments. *Advances in agronomy*, 106, 37-75.
[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)06002-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)06002-5)
- Piepho, H. P., Möhring, J., Melchinger, A. E., & Büchse, A. (2008). BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica*, 161(1), 209-228. <https://doi.org/10.1007/s10681-007-9449-8>
- Pour-Aboughadareh, A., Mohammadi, R., Etminan, A., Shooshtari, L., Maleki-Tabrizi, N., & Poczai, P. (2020). Effects of drought stress on some agronomic and morpho-physiological traits in durum wheat genotypes. *Sustainability*, 12(14), 5610.
<https://doi.org/10.3390/su12145610>

- Prasad P. V. Vara, Djanaguiraman Maduraimuthu (2014) Response of floret fertility and individual grain weight of wheat to high temperature stress: sensitive stages and thresholds for temperature and duration. *Functional Plant Biology* 41, 1261-1269. <https://doi.org/10.1071/FP14061>
- Prieto, P., Ochagavía, H., Griffiths, S., & Slafer, G. A. (2020). Earliness per sex × temperature interaction: consequences on leaf, spikelet, and floret development in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 71(6), 1956-1968. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz568>
- Radhakrishna Bhandari, Harikala Paudel, Sulaiman Ali Alharbi, Mohammad Javed Ansari, Mukti Ram Poudel, Madhav Prasad Neupane, Pratima Solanki, Ujjawal Kumar Singh Kushwaha. (2024). Evaluating stress tolerance indices for their comparative validity to assess terminal heat stress and heat drought tolerance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18,101506. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101506>
- Redden, R. (2013). New approaches for crop genetic adaptation to the abiotic stresses predicted with climate change. *Agronomy*, 3(2), 419-432. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020419>
- Reddy, S. S., Singh, G. M., Kumar, U., Bhati, P., Vishwakarma, M., Navathe, S., ... & Joshi, A. K. (2024). Spatio-temporal evaluation of drought adaptation in wheat revealed NDVI and MTSI as powerful tools for selecting tolerant genotypes. *Field Crops Research*, 311, 109367. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109367>
- Reynolds, M. P. (1996). Increasing yield potential in wheat: breaking the barriers: proceedings of a workshop held in Ciudad Obregón, Sonora, Mexico. Cimmyt.
- Reynolds, M. P., Bonnett, D., Chapman, S. C., Furbank, R. T., Manès, Y., Mather, D. E., & Parry, M. A. J. (2009). Raising yield potential of wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60(7), 1899–1918. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp016>

- Reynolds, M. P., Mujeeb-Kazi, A., y Sawkins, M. (2005). Prospects for utilising plant-adaptive mechanisms to improve wheat and other crops in drought- and salinity-prone environments. *Annals of applied biology*, 146(2), 239-259. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.040058.x>
- Reynolds, M. P., Pask, A. J. D., & Mullan, D. M. (2012). Physiological breeding I: interdisciplinary approaches to improve crop adaptation. *CIMMYT*.
- Reynolds, M., Manes, Y., Izanloo, A., & Langridge, P. (2009). Phenotyping approaches for physiological breeding and gene discovery in wheat. *Annals of Applied Biology*, 155(3), 309-320.
- Riaz, M., Farooq, J., Sakhawat, G., Mahmood, A., Sadiq, M. A., & Yaseen, M. (2013). Genotypic variability for root/shoot parameters under water stress in some advanced lines of cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Genet. Mol. Res*, 12(1), 552-61.
- Rosielle, A. A., & Hamblin, J. (1981). Theoretical aspects of selection for yield in stress and non-stress environment 1. *Crop science*, 21(6), 943-946. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060033x>
- Sallam, A., Alqudah, A. M., Dawood, M. F., Baenziger, P. S., & Börner, A. (2019). Drought stress tolerance in wheat and barley: advances in physiology, breeding and genetics research. *International journal of molecular sciences*, 20(13), 3137. <https://doi.org/10.3390/ijms20133137>
- Sayre, K. D., Rajaram, S., & Fischer, R. A. (1997). Yield potential progress in short bread wheats in northwest Mexico. *Crop science*, 37(1), 36-42. <https://doi.org/10.2135/cropsci1997.0011183X003700010006x>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2024). Informe anual de producción de trigo en México [Informe]. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Sehgal, A., Sita, K., Siddique, K. H., Kumar, R., Bhogireddy, S., Varshney, R. K., ... & Nayyar, H. (2018). Drought or/and heat-stress effects on seed filling in food crops: impacts on functional biochemistry, seed yields, and nutritional quality. *Frontiers in plant science*, 9, 1705. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01705>

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). Producción de trigo en México: estadísticas y tendencias [Informe]. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Dirección General de Información Agroalimentaria y Pesquera. [https://pubhtml5.com/aheiy/oyp/Panorama Agroalimentario 2022/](https://pubhtml5.com/aheiy/oyp/Panorama_Agroalimentario_2022/)
- Sewore, B. M., Abe, A., & Nigussie, M. (2023). Evaluation of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes for drought tolerance using morpho-physiological traits under drought-stressed and well-watered conditions. *Plos one*, 18(5), e0283347. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0283347>
- Shamuyarira, K. W., Shimelis, H., Figlan, S., & Chaplot, V. (2023). Combining ability analysis of yield and biomass allocation related traits in newly developed wheat populations. *Scientific Reports*, 13(1), 11832. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38961-6>
- Shen, J., & Evans, F. H. (2021). The potential of landsat NDVI sequences to explain wheat yield variation in fields in Western Australia. *Remote Sensing*, 13(11), 2202. <https://doi.org/10.3390/rs13112202>
- Slafer, G. A., Elia, M., Savin, R., García, G. A., Terrile, I. I., Ferrante, A., Miralles, D. J., & González, F. G. (2014). Fruiting efficiency: An alternative trait to further rise wheat yield. *Food and Energy Security*, 4(2), 92–109. <https://doi.org/10.1002/fes3.59>
- Slafer, G. A., Savin, R., & Sadras, V. O. (2014). Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research*, 157, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.004>
- Snowdon, R. J., Wittkop, B., Chen, T. W., & Stahl, A. (2021). Crop adaptation to climate change as a consequence of long-term breeding. *Theoretical and Applied Genetics*, 134(6), 1613-1623. <https://doi.org/10.1007/s00122-020-03729-3>
- Soriano, J. M., Villegas, D., Sorrells, M. E., & Royo, C. (2018). Durum wheat landraces from east and west regions of the mediterranean basin are

- genetically distinct for yield components and phenology. *Frontiers in Plant Science*, 9(80). <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00080>
- Thapa, S., Rudd, J. C., Xue, Q., Bhandari, M., Reddy, S. K., Jessup, K. E., ... & Baker, S. (2019). Use of NDVI for characterizing winter wheat response to water stress in a semi-arid environment. *Journal of Crop Improvement*, 33(5), 633-648. <https://doi.org/10.1080/15427528.2019.1648348>
- Thungo, Z., Shimelis, H., Odindo, A. O., & Mashilo, J. (2019). Genotype-by-environment interaction of elite heat and drought tolerant bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes under non-stressed and drought-stressed conditions. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 69(8), 725-733. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1646797>
- Wang, D., Zhang, X., Cao, Y., Batool, A., Xu, Y., Qiao, Y., ... & Xiao, J. (2024). TabHLH27 orchestrates root growth and drought tolerance to enhance water use efficiency in wheat. *Journal of Integrative Plant Biology*, 66(7), 1295-1312. <https://doi.org/10.1111/jipb.13670>
- Wang, X., Li, X., Tan, M., & Xin, L. (2015). Remote sensing monitoring of changes in winter wheat area in North China Plain from 2001 to 2011. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(8), 190-199.
- Wang, Y., Zhang, Y., Zhang, R., Li, J., Zhang, M., Zhou, S., & Wang, Z. (2018). Reduced irrigation increases the water use efficiency and productivity of winter wheat-summer maize rotation on the North China Plain. *Science of the Total Environment*, 618, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.284>
- Wang, Z., Zhang, B., Li, J., Lian, S., Zhang, J., & Shi, S. (2024). Effects of Deficit-Regulated Irrigation on Root-Growth Dynamics and Water-Use Efficiency of Winter Wheat in a Semi-Arid Area. *Water*, 16(18), 2678. <https://doi.org/10.3390/w16182678>
- Wen, P., Meng, Y., Gao, C., Guan, X., Wang, T., & Feng, W. (2023). Field identification of drought tolerant wheat genotypes using canopy vegetation

- indices instead of plant physiological and biochemical traits. *Ecological Indicators*, 154, 110781. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110781>
- Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker III, C. J. (2015). Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to assess Land degradation at multiple scales: status, future trends, and practical considerations. Springer.
- Zhang, X., Wang, Y., Sun, H., Chen, S., & Shao, L. (2013). Optimizing the yield of winter wheat by regulating water consumption during vegetative and reproductive stages under limited water supply. *Irrigation Science*, 31, 1103-1112. <https://doi.org/10.1007/s00271-012-0391-8>
- Zhou, Y., Conway, B., Miller, D., Marshall, D., Cooper, A., Murphy, P., ... & Costa, J. (2017). Quantitative trait loci mapping for spike characteristics in hexaploid wheat. *The Plant Genome*, 10(2). <https://doi.org/10.3835/plantgenome2016.10.0101>